

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉVALUATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DUES
AU TRANSPORT ROUTIER LOURD DANS LE CONTEXTE
D'UN PORT NON-CONTENEURISÉ À L'AIDE DE LA SIMULATION

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA GESTION

PAR
AFEF LAGHA

AVRIL 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

École de gestion

Ce mémoire intitulé :

Évaluation des émissions de gaz à effet de serre dues au transport routier lourd dans le
contexte d'un port non-conteneurisé à l'aide de la simulation

Présenté par : Afef Lagha

En vue de l'obtention du grade de : Maître ès sciences

A été dirigé par :

Jean-François Audy, Ph.D. Directeur de recherche

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Jean-François Audy, Ph.D. Directeur de recherche

Amina Lamghari, Ph.D. Évaluatrice interne

Mustapha Ouhimmou, Ph.D. Évaluateur externe

REMERCIEMENTS

Je souhaite adresser mes vifs remerciements à toutes les personnes, qui, de près ou de loin, m'ont accompagné, m'ont soutenu et m'ont apporté une aide précieuse dans ce laborieux travail de maîtrise.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, professeur Jean-François Audy pour son accueil, sa patience, son soutien, ses encouragements et son engagement toute au long de cette aventure. Grâce à sa confiance et ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion, j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions.

Je voudrais remercier également Docteur Bechir Ben Daya de m'avoir offert la chance de collaborer avec lui et d'avoir bénéficié de son mentorat inspirant. Sa vision, son expertise et son dévouement envers l'excellence scientifique ont joué un rôle fondamental dans la concrétisation de ce projet de recherche. C'est grâce à son soutien que j'ai pu atteindre les résultats que je présente aujourd'hui.

Je voudrais aussi témoigner mon immense reconnaissance aux divers partenaires : l'Administration portuaire de Trois-Rivières, le Réseau Québec maritime et Mitacs pour leur précieuse collaboration et leur soutien financier.

SOMMAIRE

Le développement mondial de l'industrie et du commerce a entraîné une augmentation constante de la demande de transport. Cette croissance génère des bénéfices économiques pour les villes portuaires et leurs régions avoisinantes. Toutefois, elle a mis les parties prenantes sous pression croissante à cause de l'accentuation de la pollution atmosphérique liés aux opérations portuaires et leur effet sur l'environnement. Face à ces enjeux, les autorités portuaires sont de plus en plus soucieuses de réduire leur impact environnemental afin de lutter contre les effets du changement climatique. Elles cherchent à adopter des pratiques durables et à investir dans des projets qui visent à se pourvoir d'une perception claire de leur empreinte carbone dans le but de la réduire et atteindre la carboneutralité d'ici 2050. L'Administration portuaire de Trois-Rivières en est un exemple concret. En 2018, cette dernière a dévoilé sa planification stratégique cap sur 2030. Un des piliers de cette planification est la construction d'un nouveau terminal qui doit se traduire par une augmentation de 40 à 50 % de la capacité globale du port en matière de tonnage transitant par le port. La mise en service d'un tel projet affectera les habitudes de transport à l'intérieur et à l'extérieur du port, notamment le transport routier lourd (camions). Actuellement environ 43000 camions transitent annuellement par ce port et avec les activités de construction qui se dérouleront durant les travaux, un flux additionnel significatif de camionnage s'y ajoutera en plus de prévision à la hausse du tonnage transitant présentement par le port et recourant au camionnage. Un projet d'expansion de cette envergure soulève plusieurs enjeux notamment en regard des impacts sur l'environnement et plus spécifiquement sur le transport routier qui constitue une source importante des émissions de gaz à effet de serre. Face à cette situation, il est essentiel de disposer d'outil d'évaluation et de prédiction de l'empreinte carbone émise par les camions.

Ce travail propose un modèle pour estimer les émissions de gaz à effet de serre dues au transport routier lourd dans le contexte d'un port non-conteneurisé. Ce modèle s'appuie sur un cadre basé sur des données empiriques provenant du suivi du trafic des camions dans

le port. Il prend également en compte une dimension spatiale, segmentant le port selon la nature du fret. Cette segmentation augmente la précision du modèle en considérant des aspects géographiques et opérationnels comme les distances parcourues, les vitesses et les temps de chargement/déchargement. Dans une phase ultérieure, le modèle développé est inséré dans un outil de simulation pour évaluer le scénario de référence qui concerne les émissions annuelles de base ainsi qu'un scénario de prédiction pour évaluer celles durant la période de construction. L'approche de simulation utilisée permet notamment de comprendre l'effet du découpage en zones du port sur les émissions, en s'appuyant sur des éléments stochastiques spécifiques à chaque zone. Ainsi, une analyse de sensibilité a été effectuée pour analyser l'impact de l'optimisation des temps de chargement/déchargement sur l'empreinte carbone.

Les résultats montrent que le transport terrestre associé à l'activité portuaire engendre des émissions annuelles de 453 tonnes de CO₂ équivalent. Dans le contexte prévisionnel de la période de construction, cette empreinte augmente significativement pour atteindre 1080 tonnes de CO₂ équivalent par an. Cela représente une croissance notable de 138%, soit 3 tonnes par jour. Cette hausse est principalement due à l'augmentation du nombre de camions de fret utilisant le port et aux camions impliqués dans la construction du nouveau terminal (une moyenne de 145 camions par jour). Les résultats indiquent aussi qu'un camion émet, en fonction de sa zone de destination et de son activité (en mouvement ou à l'arrêt), entre 9 et 12 kg de CO₂ équivalent en moyenne. Ainsi, le temps d'attente à l'intérieur du port est le facteur principal des émissions dans le port. Face à ces constats, des solutions visant à réduire les émissions de GES sont suggérées et les défis associés à leur déploiement sont discutés.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	II
SOMMAIRE.....	III
TABLE DES MATIÈRES.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTES DES ACRONYMES.....	X
1. INTRODUCTION.....	1
2. ARTICLE SCIENTIFIQUE.....	7
2.1 Résumé et mots clés.....	7
2.2 Contexte général.....	7
2.3 Revue de littérature.....	10
2.4 Méthodologie.....	24
2.4.1 Zone d'étude.....	25
2.4.2 Collecte, traitement et analyse des données.....	27
2.4.3 Modèle d'émission GES.....	51
2.4.4 Modèle de simulation.....	57
2.5 Résultats.....	61
2.5.1 Scénario de référence.....	61
2.5.2 Prévission des émissions pour la période de construction.....	65
2.6 Conclusion.....	69
3. ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET DISCUSSION.....	70
3.1 Analyse de sensibilité.....	70
3.1.1 Conception des scénarios.....	73
3.1.2 Présentation des résultats et interprétations.....	74
3.2 Discussion.....	81
3.2.1 Discussion des résultats.....	81
3.2.2 Comparaison avec d'autres travaux.....	82

3.2.3 Solutions proposées pour la réduction des émissions de GES.....	84
3.2.4 Limites et perspectives.....	86
4. CONCLUSION GÉNÉRALE	89
RÉFÉRENCES	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Comparaison entre l'approche macroscopique et microscopique.	14
Tableau 2: Statistiques sur la moyenne des TS par semaine pour la période 2017-2019.	29
Tableau 3: Exemple d'une observation : Données brutes recueillies par le système de suivi	36
Tableau 4: Évaluation des paramètres basée sur l'exemple du Tableau 3.	38
Tableau 5: Statistiques descriptives des données après la première étape de traitement.	39
Tableau 6: Distribution de probabilité adoptée pour les paramètres de modélisation.	49
Tableau 7: Distributions de probabilité pour la zone A.	50
Tableau 8: Distributions de probabilité pour la zone C.	51
Tableau 9: Émissions des camions par catégorie de GES en fonction de la vitesse.	52
Tableau 10: Résultat annuel des émissions et du temps passé au port par zone.	62
Tableau 11: Résultats annuels du temps et des émissions de GES pour chaque zone.	65
Tableau 12: Scénarios de l'analyse de sensibilité.	74
Tableau 13: Résultat de l'analyse de sensibilité par scénario.	76
Tableau 14: Comparaison des émissions de GES annuelles pour des différents ports.	83
Tableau 15: Solutions de réduction des émissions de GES.	85

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cadre méthodologique du modèle d'évaluation des émissions de GES	25
Figure 2: Localisation du port de Trois-Rivières sur le fleuve Saint-Laurent	26
Figure 3: Zonage du ports et portes d'accès.....	27
Figure 4: Histogramme du TS moyen pour la zone A	30
Figure 5: Boîte à moustaches de la dispersion du TS moyen pour la zone A.....	30
Figure 6: Histogramme du TS moyen pour la zone B	31
Figure 7: Boîte à moustaches de la dispersion du TS moyen pour la zone B.....	31
Figure 8: Histogramme du TS moyen pour la zone C	32
Figure 9: Boîte à moustaches de la dispersion du TS moyen pour la zone C.....	32
Figure 10: Histogramme du TS ajusté pour la zone A	33
Figure 11: Histogramme du TS ajusté pour la zone B.....	33
Figure 12: Histogramme du TS ajusté pour la zone C.....	34
Figure 13: Répartition des capteurs au sein des zones portuaires (source : https://www.smatstraffic.com).	35
Figure 14: Illustration des nœuds parcourus selon l'exemple du Tableau 3	36
Figure 15: Boîte à moustaches de la dispersion de LUT pour la zone A.....	40
Figure 16: Boîte à moustaches de la dispersion de LUT pour la zone C.....	41
Figure 17: Boîte à moustaches illustrant la distribution du LUT de la zone A après ajustement.....	41
Figure 18: Boîte à moustaches illustrant la distribution du LUT de la zone C après ajustement.	42
Figure 19: Boîte à moustaches de la dispersion de la vitesse pour la zone A.....	43
Figure 20: Boîte à moustaches de la dispersion de la vitesse pour la zone C.....	43
Figure 21: Histogramme des observations de vitesse pour la zone A après le premier ajustement	44
Figure 22: Histogramme des observations de vitesse pour la zone C après le premier ajustement.....	44
Figure 23: Histogramme des observations de vitesse pour la zone A après le deuxième ajustement	45
Figure 24: PHistogramme des observations de vitesse pour la zone C après le deuxième ajustement. .	45
Figure 25: Boîte à moustaches illustrant la dispersion de la distance pour la zone A.....	46
Figure 26: Boîte à moustaches illustrant la dispersion de la distance pour la zone C.	46
Figure 27: Histogramme des observations de la distance pour la zone A après ajustement.....	47
Figure 28: Histogramme des observations de la distance pour la zone C après ajustement.....	47
Figure 29: Itinéraire de la zone B en aller-retour (Source : Goudreau et al., 2017).	48
Figure 30: Itinéraires prévus des camions pour le Terminal 21 (zone D)	48
Figure 31: Modèle de régression polynomiale des émissions basé sur la vitesse.....	54
Figure 32: Conception du modèle de simulation.....	59
Figure 33: Framwork du processus de la simulation	60
Figure 34: Répartition annuelle du temps en fonction de l'état des camions et des zones visitées.....	62
Figure 35: Émissions annuelles de GES par état de camion et par zone visitée.....	63
Figure 36: Durée moyenne passé dans le système par état de camion et par zone visitée	64
Figure 37: Moyenne des émissions de GES par état de camion et par zone visitée (en kg éqCO ₂)	64
Figure 38: Émissions annuelles de GES par état de camion et zone visitée.....	66
Figure 39: Temps annuel passé dans le système par état de camion et zone visitée.	66
Figure 40: Répartition moyenne des émissions de GES par zone et par état des camions dans le système portuaire.....	67
Figure 41: Durée moyenne passé dans le système par état de camion et par zone visitée	68

Figure 42:Accroissement annuel des émissions de GES.	68
Figure 43:Variation du temps d'attente par rapport au temps de chargement/déchargement	72
Figure 44:Tendance de variation des émissions de GES en fonction des variations de LUT pour la zone A.	77
Figure 45:Tendance de variation des émissions de GES en fonction des variations de LUT pour la zone B	78
Figure 46:Tendance de variation des émissions de GES en fonction des variations de LUT pour la zone C.	79
Figure 47:Tendance de variation des émissions de GES en fonction des variations de LUT pour la zone D	80

LISTES DES ACRONYMES

h : Heure

t : Tonne

Min : Minute

Km : Kilomètre

g : Gramme

s : seconde

Mph : Mile par heure

Éq CO₂ : Équivalent CO₂

GES : Gaz à effet de serre

TAS : Truck Appointment System

VBS : Vehicle Booking System

MG : Main gate

SG : Second gate

1. INTRODUCTION

L'effet de serre est un processus naturel de l'atmosphère terrestre déclenché par le rayonnement solaire atteignant la Terre. Ce phénomène est altéré par les émissions de GES provenant de sources anthropiques comprenant notamment les combustibles fossiles consommés par les différents modes de transports motorisés tels que le diesel, qui émettent du CO₂ lors de la combustion. C'est ainsi que les GES émis en trop grande quantité contribuent à l'augmentation de la température terrestre (MELCC, 2023). Les GES ne sont pas des polluants ordinaires. Ils sont liés à presque toutes les activités et tous les services, et leur émission est favorisée par des infrastructures ayant souvent une grande longévité (Comité sénatorial, 2017). D'après le Protocole de Kyoto (1997), les six gaz à effet de serre sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), l'hexafluorure de soufre (SF₆), les hydrofluorocarbures (HFC) et les perfluorocarbures (PFC) ou hydrocarbures perfluorés. Ces gaz ont des potentiels de réchauffement global différents, d'où l'utilisation du « CO₂ équivalent » comme mesure standard. Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a précisé en 2014 que « L'émission en équivalent CO₂ est la quantité émise de dioxyde de carbone (CO₂) qui provoquerait le même forçage radiatif intégré, pour un horizon temporel donné, qu'une quantité émise d'un seul ou de plusieurs gaz à effet de serre » (GIEC, 2014).

Parmi les secteurs les plus polluants au monde, le secteur du transport est considéré comme un contribuant majeur à la production des émissions des GES par l'utilisation massive du combustible fossile. Selon une estimation approximative, les moyens de transport consomment 59% du pétrole et produisent 22% du dioxyde de carbone chaque année dans le monde entier (OPEC, 2019). Entre 1990 et 2021, les émissions totales provenant du transport de marchandises au Canada ont augmenté de 62 % et les émissions des camions lourds ont presque doublé (ECCC, 2023).

Au cours des 25 dernières années, le secteur des transports a subi une métamorphose profonde. Ce secteur est devenu une activité importante pour l'humain, en raison de la

propagation de la population et de son dynamisme économique, évoluant sans cesse grâce aux nouvelles technologies et aux tendances émergentes. L'évolution du secteur des transports avec des volumes de marchandises de plus en plus importants se fait progressivement sentir au sein du secteur portuaire et maritime. En effet, le transport maritime et les infrastructures portuaires, en tant qu'éléments clés des chaînes d'approvisionnement mondiales, jouent un rôle primordial dans le dynamisme économique des nations. Ils agissent non seulement comme moteurs du commerce mais aussi comme des catalyseurs majeurs de croissance et de développement. Depuis 1990, la capacité de transport de la flotte mondiale de conteneurs a été multipliée par six et ne cesse pas d'augmenter (Tran & Haasis, 2014). Toutefois, le développement du secteur portuaire se traduit automatiquement par l'augmentation des émissions de GES liées à toutes les activités notamment le transport routier de fret fréquemment employé pour le transfert de marchandises entre les terminaux, entrepôts, zones de stockage et vers leurs destinations finales. En plus, les ports sont souvent situés dans des zones densément peuplées ou à proximité des centres urbains, ce qui peut entraîner des problèmes de congestion routière. L'engorgement du trafic entraîne des déplacements plus lents, des temps d'attente plus longs et une augmentation de la consommation de carburant, ce qui se traduit par des émissions de GES supplémentaires. Martin Imbleau (2022), le directeur général du Port de Montréal, mentionne qu'« Avec plus de 36 518 tonnes de GES, le secteur du transport est responsable à lui seul de 43,3 % des émissions de GES. Si le transport des personnes génère une part importante, notamment les véhicules personnels, le transport des marchandises obtient la part du lion ». Phan & Kim (2016) affirment que le trafic routier dans les zones portuaires est à l'origine de différents problèmes environnementaux dus à l'émission de CO₂. Selon le même auteur, cela est une des raisons principales pour lesquelles les études portent sur la congestion routière dans les ports. Olaf (2014) atteste que la question environnementale est devenue une préoccupation majeure voire une nécessité impérieuse à laquelle s'intéressent de près les grands ports dans le monde entier. De nombreux ports, tant canadiens qu'internationaux, ont rejoint le défi de la carboneutralité d'ici 2050 et investissent dans les recherches et la mise en œuvre des politiques et d'initiatives pour

atteindre cet objectif. Basée sur des questionnaires spécifiques sur les activités des quinze terminaux du port de Montréal, une étude menée par Transports Canada (2009) sur les émissions des opérations terrestres et maritimes de ce port a montré une augmentation de la consommation de carburant par les camions contre une diminution de quelques contaminations atmosphériques par rapport aux années précédentes. Cette réduction est expliquée par l'utilisation du carburant à faible teneur en soufre et l'instauration des normes rigoureuses pour les systèmes de contrôle des émissions pour les moteurs des camions. Pour approfondir l'analyse des activités des camions, l'étude s'est appuyée sur des questionnaires détaillés couvrant entre autres plusieurs champs dont « le point d'entrée et de sortie au port de Montréal », « le temps moyen sur les terrains du terminal pour chaque camion », « le temps moyen en mode ralenti pour chaque camion » et « autres points de destinations significatives au port ». Depuis 2016, le port de Montréal a lancé un projet qui consiste à développer une application web et mobile basé sur une combinaison de technologie RFID (identification par radio fréquence) et la reconnaissance de plaques d'immatriculation pour suivre les mouvements des camions. Cet outil permet d'afficher en temps réel les délais d'attente liés à la circulation dans le port et pour son accès (guérite d'entrée), de façon que les conducteurs puissent prendre des décisions éclairées quant à leurs déplacements, et par conséquent d'améliorer le trafic de camions à l'intérieur du port. Ce projet a porté ses fruits puisqu'en 2020, 3075 tonnes de GES ont été émises au port de Montréal avec une diminution de 9% par rapport à 2019 et de 25% par rapport à 2007 (Port Montréal, 2020). Lee et al. (2009) attestent que le transport de marchandises au port de Los Angeles est responsable de 10% des émissions de monoxyde d'azote (NO) et que le remplacement de la flotte par des camions plus propres au port permet d'obtenir des réductions importantes d'émissions. Goudreau (2018) souligne l'effort réglementaire en Californie pour réduire les temps d'attente et les émissions associées dans les ports. Au port de Vancouver, les émissions de GES, augmentent de pair avec la croissance des échanges commerciaux au sein du port. Cependant, l'intensité de ces émissions, mesurée sous la forme de tonne d'équivalent de CO₂ par tonne de marchandise, a diminué depuis 2010, suite à l'introduction des améliorations en matière des moteurs et des équipements. Dans

l'objectif de réduire d'environ 50 % son empreinte carbone d'ici 2030, le port a lancé plusieurs initiatives. Parmi elles, la mise à l'essai des options de technologie propre pour les camions porte-conteneurs et l'adoption de la technologie Effenco qui contrôle automatiquement le démarrage et l'arrêt des camions. Ce système permet de réduire la marche au ralenti inutile des camions aux terminaux et de minimiser les émissions de GES (Port de Vancouver, 2018).

De sa part, le port de Trois-Rivières n'est pas à l'abri de ces évolutions. Depuis quelques années maintenant, l'Administration portuaire de Trois-Rivières (APTR) travaille afin d'intégrer le développement durable à l'ensemble de ses activités et à promouvoir cette pratique auprès de ses parties prenantes. Dans cette perspective, elle souhaite améliorer la gestion des émissions de GES produites sur son territoire d'action et atteindre l'objectif cible d'être un port carboneutre. En 2018, l'APTR a lancé sa planification stratégique cap sur 2030. Un élément principal de ce plan est la construction d'un nouveau terminal qui doit se traduire par une augmentation de 40% à 50% de la capacité globale du port en matière de tonnage transitant par le port. Ce projet majeur d'expansion se veut une réponse au trafic maritime croissant auquel fait face le port de Trois-Rivières. Un projet d'expansion de cette envergure soulève plusieurs enjeux, notamment en regard de l'environnement. Actuellement, environ 43000 camions/an transitent par le port et un flux additionnel de camions s'ajoutera lors des activités de construction du nouveau terminal. Cette augmentation se reflète par une hausse des émissions de GES émises par le transport routier portuaire. De ce fait, le besoin d'évaluer et ultérieurement réduire l'empreinte carbone dans le port est imminent. C'est dans cette optique que ce projet de recherche prend tout son sens. L'objectif principal de ce travail est de développer un outil d'évaluation et de prédiction de l'empreinte carbone du transport routier dans le contexte d'un port non-conteneurisé.

La quantification précise des émissions de GES des camions à l'intérieur des enceintes portuaires nécessite une approche multifacette. Bien qu'il existe dans la littérature plusieurs modèles pour évaluer l'empreinte carbone dans le contexte portuaire, il est rare de trouver

des études qui se penchent sur les émissions de GES associées aux états des camions (déplacement et attente) à l'intérieur de l'enceinte portuaire. D'une part, la plupart des études tendent à calculer et réduire les émissions aux guérites plutôt qu'à l'intérieur du port lui-même. Cela peut être expliqué par la complexité de l'environnement, la diversité des activités et la dispersion des sources d'émissions à l'intérieur du port ce qui rend difficile la collecte de données. D'autres part, la majorité des travaux se concentrent uniquement sur les déplacements des camions, les émissions provenant de l'attente, souvent sous-estimées et négligées, sont tout aussi cruciales. En effet, les émissions générées par les mouvements des camions sont généralement plus faciles à mesurer et à quantifier que celles liées à l'attente des camions qui varient considérablement en fonction de divers facteurs, tels que la congestion du trafic et les régimes de moteurs (ralentissement, arrêt, démarrage). En raison de cette variabilité, il peut être difficile de quantifier avec précision les émissions liées à l'attente des camions. De plus, la littérature existante se concentre sur l'investigation de l'empreinte carbone dans le cadre des ports conteneurisés, tandis que peu d'études abordent l'empreinte carbone dans le contexte des ports non conteneurisés. Cela met en évidence un écart notable, laissant place à l'exploration et à l'analyse dans le domaine des ports non conteneurisés.

Dans ce mémoire avec insertion d'un article scientifique, nous introduisons un modèle mathématique novateur pour évaluer l'empreinte carbone dues aux mouvements et aux attentes du transport routier depuis son entrée jusqu'à sa sortie du port et c'est ici que réside l'originalité et la contribution de ce travail. Spécifiquement, ce modèle mathématique a été implémenté dans un modèle de simulation qui s'appuie sur une étude approfondie du trafic dans des différentes zones du port ainsi que sur des paramètres stochastiques provenant d'une analyse de données réelles. Les résultats obtenus à l'aide de la simulation mettent en lumière une ventilation des émissions de GES selon les états d'un camion et ce pour chaque zone offrant ainsi aux décideurs portuaires des orientations claires pour cibler et réaliser les objectifs de diminution de l'empreinte carbone.

Ce mémoire est organisé comme suit : la deuxième section présente l'article scientifique,

la troisième section se consacre à une analyse de sensibilité, discute les résultats obtenus et évoque les limites ainsi que les perspectives de cette étude. La section finale synthétise l'ensemble du travail.

2. ARTICLE SCIENTIFIQUE

2.1 Résumé et mots clés

Les ports maritimes sont perçus comme des centres multimodaux de la chaîne d'approvisionnement logistique où divers modes de transport se croisent pour échanger des marchandises expédiées par des navires de grande capacité. L'augmentation des échanges fait de ce secteur un contributeur majeur aux émissions de GES. Les décideurs politiques nationaux et régionaux considèrent la durabilité des ports comme une préoccupation lors de la planification des projets d'atténuation des émissions. Cependant, pour planifier et bien mener des programmes de gestion des GES, il est essentiel de se concentrer sur le développement d'une approche d'évaluation appropriée qui corresponde bien au contexte opérationnel et géographique du port en question. Plusieurs modèles et méthodologies d'évaluation des GES sont disponibles dans la littérature scientifique pour les contextes portuaires, mais, leur généralisation est difficile pour de nombreuses raisons, notamment en considération des spécificités du trafic dans le port. Ce document présente donc un modèle d'évaluation des émissions du transport routier dans le contexte d'un port non-conteneurisé, basé sur une étude approfondie du trafic par zone portuaire et sur des paramètres issus de plusieurs sources de données réelles. Ce modèle a été implémenté dans un modèle de simulation pour l'évaluation et la prévision des émissions. Le résultat montre la structure de l'empreinte carbone par état de camion et par zone et fournit une perspective claire aux décideurs politiques pour cibler et réaliser un plan de réduction des émissions de GES.

Les mots clés liés à cet article sont les suivants : port non-conteneurisé ; modèle d'émissions de GES ; modèle de simulation ; transport routier.

2.2 Contexte général

À mesure que le développement économique régional, national et international prend de l'ampleur, la demande en matière de transport dans les chaînes d'approvisionnement

augmente en conséquence. Cette croissance est particulièrement évidente dans le secteur portuaire et maritime, qui connaît un développement significatif au cours des deux dernières décennies (Du et al., 2011). Les ports maritimes servent de centres logistiques multimodaux où divers équipements de transport, tels que les navires, les bateaux, les camions, les équipements de manutention et les locomotives se croisent pour faciliter les échanges de marchandises. L'augmentation du volume des échanges contribue à la hausse des émissions de GES dans ce secteur. Cela a un impact négatif sur le changement climatique et sur la santé humaine. Moriarty & Honnery (2008) ont observé que le secteur du transport contribue à hauteur de 20 à 25 % à la consommation énergétique globale et aux émissions de CO₂ mondiales, jouant ainsi un rôle significatif dans l'évolution du changement climatique.

En 2020, le secteur des transports au Canada a été responsable de l'émission de 159 mégatonnes d'équivalent CO₂, constituant 24 % du total des émissions de GES du pays. Par ailleurs, entre 1990 et 2020, les émissions liées au transport de marchandises ont connu une hausse de 54 %, le transport routier étant le principal contributeur (ECCC, 2022). Pachakis et al. (2008) attestent que les camions sont la deuxième source d'émissions dans les ports, après les navires. Face à cette réalité et dans l'optique de privilégier une démarche plus respectueuse de l'environnement pour les opérations portuaires, de nombreux ports investissent dans des projets visant à réduire les émissions de GES issues du transport routier.

En effet, les activités portuaires sont ciblées par les programmes de réduction de GES en raison de leur rôle de plaque logistique tournante et de l'augmentation du volume de véhicules fréquentant le port. Les horizons 2030 et 2050 visent successivement les réductions substantielles des émissions et l'atteinte de la carboneutralité afin d'éviter les pires scénarios de changement climatique. Toutefois, la mise en œuvre des politiques de réduction des GES est compliquée pour plusieurs raisons, notamment à cause de l'utilisation croissante du transport routier, les défis de la transition énergétique des véhicules lourds affectés au transport de marchandises et l'absence d'une méthode normalisée et fiable d'évaluation des émissions, en particulier dans le contexte portuaire.

Les principaux défis pour cette dernière raison sont liés au comportement imprévisible des camions à l'intérieur du port mais aussi au choix et à la disponibilité des attributs qui permettent de statuer de manière fiable sur les émissions.

Ce travail propose un modèle d'évaluation et de prédiction des émissions de GES dues aux transports routiers dans un contexte portuaire non-conteneurisé, basé sur un cadre qui dérive ses paramètres à partir de données empiriques sur le comportement des camions depuis leur entrée jusqu'à la sortie du port. Le terme « comportement » fait référence aux paramètres et aux actions des camions dans l'environnement de la simulation. Ces paramètres comprennent la vitesse, la zone de destination, le temps de chargement/déchargement, le temps d'attente, la distance parcourue et le temps passé dans le système. Il est important de noter que ce terme ne fait pas référence à la conduite autonome des camions ou au comportement des conducteurs. Le modèle développé considère les différentes zones du port séparément, en fonction du type de fret traité dans chaque zone, ce qui offre une plus grande flexibilité pour tenir compte des spécificités géographiques et opérationnelles en termes de distances d'itinéraire, de vitesses de déplacement et de temps de chargement/déchargement. En effet, le modèle prend en compte les variations des distances d'itinéraire selon chaque zone du port. Il analyse les vitesses de déplacement qui peuvent être influencées par les caractéristiques géographiques de chaque zone. Par exemple, certaines zones peuvent être sujettes à des limitations de vitesse en raison de la densité du trafic ou des conditions routières. De plus, le modèle intègre les temps de chargement/déchargement propres à chaque zone, lesquels peuvent fluctuer en fonction de la nature du fret, des équipements disponibles et d'autres facteurs opérationnels liés à la géographie de la zone.

Un système de suivi et de détection a été mis en place par l'autorité portuaire dans les différentes zones, permettant une collecte de données précieuses sur les itinéraires, les déplacements et les attentes des camions. En procédant à l'analyse et au traitement de ces données historiques, nous avons obtenu les paramètres nécessaires pour modéliser le comportement des camions dans chaque zone et calculer les émissions des GES générées selon un modèle mathématique qui considère les facteurs d'émission puisés de la méthode

utilisée par le port de la baie de San Pedro Long Beach à Los Angeles (Starcrest Consulting Group LLC, 2021). En raison des contraintes liées à la disponibilité des données, nous nous sommes inspirés de cette approche et l'avons adaptée en fonction du niveau de détail des données de traçabilité du trafic des camions généralement disponibles dans un port. Ainsi, l'intégration de certaines données de San Pedro ne visait pas à adopter un modèle préexistant, mais plutôt à intégrer une corrélation stratégique entre les émissions par type de gaz et la vitesse des camions. Cette approche méthodologique nous permet de proposer un modèle d'émissions distinct et innovant, se démarquant clairement des autres modèles existants, y compris celui de San Pedro.

Les résultats confirment l'importance de percevoir le port comme des zones indépendantes puisque les taux d'émissions des camions varient pour chaque zone en fonction de leurs attributs en termes de chargement/déchargement, de déplacement et d'attente.

Dans ce travail, nous nous intéressons particulièrement aux questions de recherche afférentes à l'élaboration d'une méthode d'évaluation et de prévision des émissions de GES, ainsi qu'aux suggestions relatives à la réduction de l'empreinte carbone. Par ailleurs, cette étude offre aux preneurs de décision un outil d'évaluation leur permettant de tester divers scénarios pour réduire les émissions, en s'appuyant sur les propositions de diminution suggérées.

L'organisation de ce document est la suivante : La première section présente une revue de la littérature pertinente, en abordant les particularités et défis inhérentes à l'adoption d'un modèle de calcul des GES des activités portuaires. La deuxième section détaille la méthodologie utilisée pour élaborer un modèle robuste visant à estimer l'empreinte carbone liée au transport routier en milieu portuaire non-conteneurisé. La troisième section analyse et interprète les résultats de la simulation, en se concentrant sur l'effet du zonage portuaire sur les tendances d'émissions.

2.3 Revue de littérature

- Typologie des ports

Les ports maritimes ne sont pas seulement des ressources économiques, mais ils

entretiennent également une relation interactive avec les villes, ce qui influence leurs taux de développement économique et urbain. Ils servent de portes d'entrée et de nœuds dans les réseaux de transport, donnant lieu à une croissance urbaine partout où ils ont été développés (Galal, 2017). Les ports peuvent être catégorisés, selon la méthode d'emballage, de chargement et de stockage de fret en deux types : conteneurisés et non conteneurisés. À la différence d'un port non conteneurisé qui s'occupe principalement du fret en vrac et des marchandises diverses, un port à conteneurs est habituellement érigé en conformité avec la planification des réseaux de transport par l'État (Medda, 2010). En effet, la principale différence entre les ports conteneurisés et non conteneurisés réside dans la manière dont les marchandises sont expédiées. Les ports conteneurisés traitent des marchandises emballées dans des conteneurs standardisés qui peuvent être facilement chargés, déchargés et transférés entre différents modes de transport. En revanche, les ports non conteneurisés ne recourent pas à la conteneurisation et disposent généralement d'infrastructures et d'équipements différents de ceux des ports à conteneurs. Le fret maritime non conteneurisé englobe les marchandises transportées sans l'utilisation de conteneurs d'expédition. Il se divise principalement en deux catégories : le fret en vrac et les marchandises diverses. Le fret en vrac comprend des cargaisons homogènes non emballées, transportées en vrac dans la cale d'un navire. Il peut s'agir de vrac liquide (comme le pétrole brut, les produits chimiques, etc.) ou de vrac sec (comme les céréales, le charbon, etc.). Les marchandises diverses sont chargées ou déchargées individuellement ou en lot. Elles peuvent être transportées sous forme de gros morceaux (par exemple, des pales d'éoliennes) ou emballées de différentes manières (par exemple, sur des palettes, dans des caisses). (GAO, 2022) (Akman, 2021) (Saloodoo, 2024).

- Modèles d'émissions GES

Ahn (1998) définit les modèles GES comme étant « des relations mathématiques utilisant des contributions de la consommation telles que le nombre de voyages, les kilomètres parcourus par le véhicule, le nombre d'arrêts, la vitesse moyenne du véhicule, etc ». Le but du développement de ces modèles est souvent d'estimer et calculer la quantité de GES

émise dans l'atmosphère par les diverses activités humaines pour élaborer des stratégies d'atténuation des émissions. Selon la majorité de la littérature, il existe deux catégories de modèles d'évaluation de l'empreinte carbone pour le transport : Les modèles macroscopiques qui fournissent des estimations des émissions dans de vastes zones, telles que les émissions des camions dans une province, et les modèles microscopiques fondés sur l'analyse instantanée et qui sont adaptés pour calculer les émissions à l'échelle d'un petit réseau comme celles de la flotte routière d'une entreprise (Dumetz et al., 2019) (Liao et al., 2012) (Wang et al., 2011) (Kyoungcho, 1998) (Barth et al., 1996) (Ahn & Trani, 2003).

Les modèles macroscopiques appelés aussi les modèles statiques ou encore les modèles Top-down, comme mentionné par (Elkafoury et al., 2013), sont utilisés pour calculer un inventaire national ou régional des émissions tout en se basant sur une activité macroscopique (temps de trajet, distance parcourue, etc.). Liao et al. (2012) soulignent que « plusieurs paramètres liés dans le modèle macroscopique comprennent : la vitesse moyenne, le temps de trajet, la distance et le temps d'arrêt ». L'inconvénient de cette catégorie c'est qu'elle ne comprend pas d'informations spécifiques. Par conséquent, les planificateurs ne peuvent pas comparer les effets de différents scénarios (Environmental Protection Agency, 2012).

Aux États-Unis, les deux premiers modèles macroscopiques développés sont le modèle MOBILE (Mobile Source Emission Factor Model) de l'Agence de protection de l'environnement (EPA) et le modèle EMFAC (Emission factors Model) du Conseil californien des ressources en air (CARB). Pour estimer les niveaux d'émission totaux, ces deux modèles produisent des facteurs d'émission, en fonction du type et de l'âge du véhicule, de sa vitesse moyenne, de la température ambiante et de son mode de fonctionnement, qui sont ensuite multipliés par les activités du véhicule telles que les kilomètres parcourus, le nombre de trajets et les heures de voyage. Toutefois, ces modèles ne tiennent pas compte généralement des facteurs liés à la route, au conducteur et au trafic tel que signalé par (Barth et al., 2001) (Board et al., 1995).

Les modèles microscopiques appelés également les modèles dynamiques ou les modèles Bottom-up, nécessitent un niveau très détaillé de données, telles que la consommation de

carburant dans différentes gammes de vitesse et conditions de conduite, ce qui entraîne souvent des coûts très élevés pour leur mise en œuvre. Cette approche ne peut pas être appliquée aux inventaires d'émissions nationaux selon (Elkafoury et al., 2013). Ces derniers auteurs distinguent deux classes des modèles microscopiques pour estimer l'empreinte carbone. D'une part, les modèles de situation de trafic qui intègrent à la fois la vitesse et les conditions de circulation (congestion dans les zones urbaines). D'autre part, les modèles instantanés qui combinent un modèle de simulation du trafic et un modèle d'émission pour fournir une description plus détaillée du comportement des émissions. Dans leur étude, Kanagaraj & Treiber (2019) distinguent deux autres classifications de modèles microscopiques : La première est catégorie concerne les modèles d'émission de profils de vitesse, qui fournissent des résultats relatifs aux facteurs d'émission locaux ou instantanés liés à un seul véhicule. La seconde catégorie porte sur les modèles d'émission modale, qui se basent sur le vecteur $e(t)$ des facteurs d'émission en fonction de la vitesse et du mode d'accélération instantané. Ahn et al. (2002) ont développé des modèles microscopiques de consommation de carburant et d'émissions pour les véhicules légers et les camions qui prennent, comme variables d'entrée, la vitesse et l'accélération instantanées. Ces modèles peuvent être utilisés en conjonction avec les mesures du système de positionnement global (GPS) pour évaluer la consommation d'énergie et l'impact sur l'environnement.

En (2000), Barth et al., ont ajouté une approche supplémentaire à celles citées ci-avant : les Méso modèles qui se situent entre l'approche macroscopique et l'approche microscopique et qui tentent de combiner les avantages des deux approches. La consommation calculée à l'aide des méso modèles reflète la consommation moyenne d'une classe de véhicules, ce qui entraîne souvent une certaine divergence des résultats lorsqu'on considère un véhicule spécifique.

Pour clôturer cette partie, une comparaison détaillée entre l'approche macroscopique et microscopique est illustrée dans le Tableau 1.

Tableau 1: Comparaison entre l'approche macroscopique et microscopique.

	Modèle macroscopique	Modèle microscopique
Application	Estimation nationale ou régionale des émissions applicables à l'ensemble du trafic	Évaluation des émissions d'un réseau de circulation pour une zone locale
Input	Kilométrage, vitesse, densité et volume du trafic	Position, vitesse, profils d'accélération et régime du moteur
Output	Consommation de carburant et émissions en kg par mètre	Consommation de carburant et émissions instantanés en kg par seconde
Limites	Ne peut pas être utilisé pour déterminer les émissions à petite échelle	Demande une ébauche détaillée des données sur la vitesse et la situation du trafic
Exemples	VEPM (Vehicle Emission Prediction Model), COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport), MOVES (Motor Vehicle Emissions Simulator), EMFAC (Emission Factors model), HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport), IVE (Integrated Vehicle Emissions	PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model), IFCM (International Fuel Consumption Model), EMIT (Emission Model for Integrated transport), VSP (Vehicle Specific Power), CMEM (Coordinated Motor Emissions Model), VT-MICRO (Vehicle Type Microscopic Model), OFCM (Overall Fuel Consumption Model

- Modèles de simulation et comportement des camions

Les travaux de recherche ont présenté un large éventail de modèles de consommation de carburant spécifiques et précis qui sont intégrés dans des modèles de simulation de trafic tout en s'appuyant sur une large sphère d'hypothèses et de scénarios pour estimer les émissions. En utilisant de multiples paradigmes de modélisation, les modèles de simulation représentent les opérations détaillées des véhicules dans le monde réel et peuvent être utilisés pour tester des différents scénarios d'exploitation ainsi que pour évaluer, mesurer et prédire les émissions des GES. La simulation est un outil qui permet de construire un environnement artificiel avec les données disponibles et d'explorer l'effet d'un nombre restreint de paramètres tel que signalé par (Keceli et al., 2013) et (Manuj et al., 2009). Elle est fréquemment utilisée par les chercheurs pour analyser et modéliser divers problèmes concernant les systèmes de transport (Dragovic et al., 2017). Arango (2019) affirme que « l'utilisation de modèles de simulation pour la gestion des ports maritimes est très courante ». Boile et al. (2013) indiquent que la simulation incorpore toutes les caractéristiques appropriées telles que le temps de service, les règles de travail, les heures de travail et les files d'attente. Toutefois, de nombreuses répliques sont nécessaires pour minimiser la variance d'échantillonnage et produire des résultats robustes dans la simulation ce qui implique un long temps de traitement. AlKheder et al. (2022) ont utilisé le logiciel de simulation Vissim pour tester et analyser deux scénarios différents dans le port de Shuwaikh au Koweït. Alors que le second scénario envisage un changement global de l'infrastructure routière et des opérations du port, le premier scénario considère ce dernier dans son état initial. En comparant les deux scénarios, les auteurs ont constaté une amélioration significative de toutes les opérations portuaires en faveur du second scénario. Par exemple, le nombre d'arrêts pendant un temps de trajet de 3600s-4500s s'élève à 483 arrêts dans le premier scénario. En revanche, dans le scénario futur, il se situe entre 250 et 404, avec une moyenne de 330 arrêts. Ils ont également confirmé que ce dernier scénario avait réduit les émissions des camions de presque la moitié (48,9 %) grâce à une meilleure gestion des opérations portuaires. Selon les mêmes auteurs, à l'intervalle de temps de

déplacement de 900 s (15 min), la vitesse moyenne est d'environ 19 km/h, le nombre d'arrêts est près de 173.

Parmi les indicateurs de performance les plus courants dans la gestion des terminaux maritimes figure le temps de rotation, ou temps de service des camions comme mentionné par (Ramirez-Nafarrate et al., 2017), (Torkjazi et al., 2018) et (Yi et al., 2019). Le temps de service est le délai qui s'écoule entre l'arrivée du camion aux portes du terminal et son départ du port selon (Lubulwa et al., 2014) et (Azab & Eltawil, 2016). Caballini et al. (2020) indiquent que le temps moyen de service des camions au terminal d'Altamira au Mexique, qui traite en moyenne 324 camions par jour, est de 21,53 min. Cependant, lorsqu'un camion effectue un double cycle, ce temps augmente à 42,15 min. D'après les mêmes auteurs, ce temps est estimé à 39,36 min en moyenne au terminal de PSA, situé dans le port de Genua en Italie qui traite environ 2500 camions par jour, mais il augmente à 52,87 min lorsqu'un double cycle est réalisé. Selon Rathnayake et al. (2015), le temps de service des camions est de 180 min au port de Colombo, 30 min au port de Singapour et au port de Dubaï tandis qu'au port de Dakar il est estimé à 20 min. Chen et al. (2011) ont mis en évidence une réduction du temps de service des camions de 40 à 100 min dans les terminaux portuaires en utilisant une théorie d'optimisation des files d'attente. Azab & Eltawil (2016) ont développé un modèle de simulation à événements discrets pour étudier l'effet de différents modèles d'arrivée des camions sur le temps de service des camions tout en considérant une vitesse maximale de 18 km/h. Huynh et al. (2011) ont observé que le temps de traitement moyen dans un terminal du port de Houston pour chaque camion était de 3 à 4 min. Selon Neagoe et al. (2021), l'augmentation du débit du transport routier dans un terminal maritime de marchandises en vrac en Australie a eu un impact notable sur le temps de service. Il a été observé qu'un camion peut être pris en charge de manière ininterrompue dans le terminal en un laps de temps de 10 à 12 min, les délais de service des camions sont généralement supérieurs à 60 min et, dans certains cas, peuvent atteindre 150 min. Il a été remarqué, aussi, qu'environ 95 % des camions sont déchargés dans l'heure suivant leur arrivée au terminal. Rusca et al. (2018) mentionnent que le temps d'arrivée entre les camions est supposé être constant (1, 2 ou 5 min). O'Brien & Le-Griffin (2013)

ont utilisé distribution de poisson pour simuler le taux d'arrivée des camions au terminal. Dennis Vlugt (2009) a opté pour une distribution exponentielle pour représenter le temps de service des camions, en utilisant trois taux dérivés à partir de trois durées de service différentes (20, 30 et 40 min). Le premier intervalle moyen (20 min) correspond au délai associé à un simple dépôt du conteneur par le camionneur. Le deuxième (30 min) représente la durée moyenne de service pour prendre un conteneur. Le troisième type de camionneur doit à la fois livrer et enlever un conteneur avec un temps de service moyen estimé à 40 min. Dans la même étude, la simulation montre une légère variation entre les arrivées suivant la loi de Poisson et celles suivant la loi uniforme en matière de temps d'attente moyen. Pour les arrivées suivant la loi de Poisson, le temps d'attente moyen quotidien par camionneur est estimé à 11,14 min, contre 10,36 min pour celles suivant la loi uniforme. Sgouridis et al. (2003) ont produit un modèle de simulation capable de simuler plusieurs jours ouvrables de la zone d'importation d'un terminal à conteneurs. Pour ce faire, ils se sont basés sur des paramètres moyens relatifs aux opérations des camions, tels que la durée de chargement/déchargement des camions (0,6 min), la vitesse hors des zones de stockage (15 km/h) et la vitesse à l'intérieur de ces zones (6,6 km/h). Zhang et al. (2006) ont noté que la vitesse nominale des camions dans les ports intérieurs et les terminaux est d'environ 12,96 km/h. Liao et al. (2012) ont proposé deux modèles d'émissions pour les flux de trafic mixte : Le premier modèle est construit à partir des caractéristiques des liaisons y compris les attributs statiques et dynamiques, telles que la longueur de la liaison, le nombre de véhicules et la vitesse moyenne. Le second modèle est basé sur les trajets et les caractéristiques des itinéraires du véhicule y compris l'identification, le nœud d'origine et la destination, l'heure de départ et d'arrivée, le temps de trajet et les temps d'arrêt. Pour les tester, les deux modèles proposés ont été intégrés dans un modèle de simulation, Dyna TAIWAN. Cela a permis aux auteurs d'évaluer les stratégies de gestion du trafic, y compris l'information en temps réel et les systèmes avancés de contrôle du trafic. Nurcahyo et al. (2020) ont rapporté un temps de déplacement moyen de 6,2 min par camion dans le port de Tanjung Priok en Indonésie. Selon (Hall & Lutsey, 2019), la vitesse moyenne des camions est comprise entre 20 et 45 mph au Ports de Los Angeles pour une distance entre

5 et 20 miles.

Les deux modes d'exploitation des camions couramment cités par les chercheurs sont le mode d'attente, où le moteur tourne au ralenti, et le mode de déplacement. Lorsqu'un camion est en attente, il émet une quantité de GES supérieure à celle qu'il rejette lorsqu'il se déplace. En effet, durant le ralenti d'un moteur, celui-ci ne fonctionne pas à son niveau de charge optimal et a tendance à se refroidir plus rapidement, ce qui entraîne une combustion incomplète et moins efficace du carburant, puisque le mélange air-carburant ne brûle pas aussi complètement que lorsqu'il est à température de fonctionnement. Cela a pour conséquence une libération accrue de GES dont le dioxyde de carbone (CO₂). Brodrick et al. (2002) affirment que les moteurs tournant au ralenti fonctionnent de manière très inefficace (environ 3 % d'efficacité énergétique contre 40 % sur autoroute) et subissent une usure plus importante.

Chen et al. (2013) affirment que l'évaluation et la réduction des émissions dans un port peuvent être réalisés en optimisant les opérations liées à la coordination de l'arrivée des camions et à la diminution du temps de service et le temps d'arrêt ainsi qu'en modernisant des équipements appartenant au port (véhicules de transport interne, grues de chantier électriques, etc). Les mêmes auteurs ont développé un modèle bi-objectif qui permet de résoudre le problème d'affectation des camions en minimisant à la fois le temps d'attente et le nombre total d'arrivées. Dans cette étude, les émissions des camions ont été évaluées sur la base du temps d'attente. Suite aux expérimentations numériques, où les taux d'arrivée des camions varient dans le temps, les résultats ont montré qu'un petit décalage des arrivées de camions peut réduire de manière significative les émissions, en particulier à la porte. Par exemple, le fait de déplacer 4 % du nombre total d'arrivées des camions des heures de pointe vers les périodes creuses de la journée pourrait réduire jusqu'à un tiers des émissions totales.

Nielsen et al. (2015) ont proposé la simulation à événements discrets pour estimer les émissions des GES provenant des camions. Dans un premier temps, les auteurs ont utilisé l'algorithme génétique basé sur la simulation pour résoudre ce modèle. Ensuite, ils ont mené des expérimentations dans le cadre d'une étude de cas dans un port au Singapour. Ils

ont ainsi constaté que les émissions des camions en attente peuvent être réduites de manière significative en prévoyant un temps de service approprié pour le ramassage des conteneurs. Par exemple, les émissions sont réduites d'environ 4 % si les périodes disponibles pour le chargement et le déchargement sont limitées à 8 ou 12 h au lieu de 24 h.

Harrison et al. (2009) ont mené une enquête auprès des chauffeurs routiers du port de Houston, au Texas, et ont constaté que les temps d'attente à l'intérieur du terminal pouvaient parfois dépasser deux heures. Le temps d'attente moyen rapporté était de 31 min, avec une médiane de 20 min et un écart-type de 29 min. Lazic (2004) a révélé que les camions sont responsables d'environ 70 % des émissions dans les terminaux à conteneurs, Cela est dû principalement aux temps d'attente prolongés et à la marche au ralenti des moteurs pour la climatisation et le chauffage. Selon une étude réalisée par Huynh et al. (2011), les camions sont confrontés à des retards importants au port de Houston lors de leur attente aux portes d'entrée et de sortie et aux parcs portuaires pendant les heures de pointe. Pour comprendre les raisons derrière les files d'attente, des webcams ont été utilisées pour déterminer les temps d'attente moyens correspondants à différentes longueurs de file. Il a été conclu que les délais d'attente significatives dans le terminal peuvent être attribué à divers facteurs, notamment les conditions météorologiques, les pauses de travail et la variabilité des arrivées de camions. Grâce à un modèle d'optimisation, Chen et al. (2013) ont rapporté une réduction théorique du temps d'attente des camions de 103 à 13 min en moyenne.

Selon Do et al. (2014), il existe trois approches de modélisation pour estimer le temps d'attente d'un camion : les modèles de simulation, les modèles de régression et les modèles de file d'attente. Dans le même article, les auteurs ont proposé un modèle mathématique pour déterminer l'heure d'arrivée des camions livrant des conteneurs au terminal. Ils ont également appliqué un modèle de simulation pour estimer le temps d'attente total et les distances de déplacement afin de calculer les émissions des camions. Les auteurs ont déterminé que les émissions résultant de l'attente des camions pourraient être considérablement réduites en restreignant les horaires et le nombre d'entrées autorisées pour ces véhicules.

Aux États-Unis, pour établir un inventaire des émissions du port de la baie de San Pedro et

estimer les taux annuels de GES, Starcrest Consulting Group LLC (2021) a sélectionné le modèle proposé par California Air Resources Board (CARB). Bien que ce dernier développe des taux d'émission « low idle » et « high idle », seuls les taux de « low idle » ont été retenus pour l'inventaire des émissions. En effet, ces taux sont vus comme des représentatifs d'un camion en file d'attente, tandis que les taux de « high idle » sont destinés à « refléter l'activité associée aux arrêts de camions, aux aires de repos et aux centres de distribution » plutôt que les opérations portuaires normales.

- Technologies de réduction des émissions de GES

En réponse aux problèmes environnementales liées à la congestion aux terminaux maritimes et aux émissions de GES qu'elle produit, plusieurs ports ont mis en place des systèmes de rendez-vous des camions (TAS) comme appelé aux États-Unis ou système de réservation des véhicules (VBS) dans d'autres parties du monde (Heilig & Vob, 2017). Le principe d'un système de rendez-vous dans un port repose sur la planification et la coordination préalable des arrivées et départs des camions. En effet, les opérateurs de terminaux fixent, en fonction de la charge de travail du terminal et la disponibilité des grues de chantier, un quota qui représente la limite maximale de camions autorisés à entrer dans une zone spécifique. Lorsque le quota pour le créneau horaire souhaité est atteint, le camion doit choisir un autre créneau horaire pour le rendez-vous. Le port de Vancouver a mis en place depuis 1999 un système de rendez-vous pour les camions. Morais & Lord (2006) ont mené une étude pour le gouvernement canadien dans laquelle ils ont confirmé l'application réussie du TAS au port de Vancouver et ont émis des recommandations pour l'implantation efficace de ce système. D'après ces auteurs, le bon fonctionnement de ce type de système est conditionné par la collaboration, la communication et le soutien entre les opérateurs portuaires et les camionneurs. En 2005, le port de Los Angeles à Long Beach (PLALB) a mis en place un système de rendez-vous à la porte et un programme d'heures prolongées d'ouverture des portes du terminal en réponse à une loi (Goudreau, 2018). L'efficacité de ces deux systèmes a été évaluée, dans trois études distinctes, par Giuliano et al. (2006, 2007, 2008). Ces derniers ont conclu que les heures prolongées à la PLALB ont permis de

déplacer 20 % des mouvements de transport de marchandises des heures de pointe aux heures creuses. Toutefois, ils ont rapporté, dans les trois études, la non-efficacité du système de rendez-vous et l'incapacité des terminaux à le faire respecter. Cet échec a été expliqué en grande partie par le manque de volonté des transporteurs à participer à ce système. Huynh & Walton (2011) attestent que le TAS pourrait être amélioré. Chen & Yang (2010) ont constaté que l'optimisation du TAS aide à uniformiser le taux d'arrivée des camions ce qui permet de réduire considérablement la congestion du terminal et aussi d'atténuer les émissions de CO₂ des véhicules lourds. Pour saisir les niveaux de congestion et d'émission, une étude de cas a été suggérée par Karafa (2012) où deux stratégies d'accès ont été implémentées au port de Newark-Elizabeth aux États-Unis. Le premier était un système de rendez-vous, le deuxième était un système des heures d'ouverture prolongées des fonctionnements du portail d'accès. L'impact de ces deux stratégies a été étudié à l'aide de différents scénarios opérationnels basés sur trois modèles d'émissions : le modèle d'émission modale global (CMEM), le Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) et le Plug-in Paramics Monitor. Ces trois modèles sont capables de calculer les émissions de CO₂, CO, NO_x aussi les émissions des particules solides émises par les camions diesel. Les résultats ont montré que la stratégie de l'extension des heures d'ouverture était le plus efficace pour augmenter le débit tandis que le système de rendez-vous avait un impact plus marqué sur les petites augmentations de la demande. Une fois que la demande atteignait des niveaux déclenchant une congestion dans le port, le TAS perdait son efficacité. Azab et al. (2019) sont allés plus loin et ont développé, en utilisant la programmation mathématique, un système collaboratif de rendez-vous, sous le nom de DCTAS (Dynamic Collaboration Truck Appointment System). Le système proposé était capable d'équilibrer les processus d'arrivée des camions externes et de réduire la congestion des camions dans les terminaux. De plus, les auteurs ont recommandé d'étudier les émissions provenant des camions et des équipements du terminal, suite à la mise en œuvre du DCTAS, dans le cadre de futures recherches.

Parmi les autres technologies de réduction des émissions de GES liées à la congestion, il existe la méthode de contrôle des arrivées de camions basée sur des « fenêtres temporelles

dépendantes des navires » (VDTW). Cette méthode vise à optimiser l'arrivée et le départ des camions qui transportent des marchandises depuis et vers les zones portuaires en fonction des activités des navires et des opérations portuaires planifiées. D'après Chen et al. (2013b), cette méthode comprend trois étapes : la première étape consiste à prédire les arrivées de camions sur la base de l'affectation des fenêtres temporelles. L'étape suivante permet de déterminer la longueur de la file d'attente des camions. La dernière étape consiste à optimiser la disposition des fenêtres de temps pour minimiser le coût total du système y compris la consommation de carburant. À travers une étude de cas basée sur un terminal en Chine, les auteurs ont montré que la méthode VDTW permet d'équilibrer les arrivées de camions et réduire notablement la congestion aux entrées du port. Cependant, ils ont souligné que cette méthode ne pourrait pas s'appliquer à tous les ports, étant donné que chacun possède ses propres caractéristiques comme le type de marchandises manutentionnées, le nombre de véhicules transitant par le port, etc. Finalement, les auteurs mentionnent que la VDTW minimise la congestion aux guérites, mais pas forcément à l'intérieur du port c'est pourquoi, ils suggèrent de créer un modèle multi-objectifs qui permet de réduire le temps d'attente tant aux guérites qu'à l'intérieur du port. Do et al. (2014) ont combiné le système de rendez-vous et la méthode VDTW pour développer une méthode qui s'appelle limited entering time (LET). Cette approche limite les moments où les camions peuvent accéder aux zones portuaires, dans le but d'atténuer les émissions et améliorer l'efficacité logistique. La littérature répertorie d'autres approches visant à diminuer l'impact environnemental du transport routier, telles que l'électrification des véhicules. Aux États-Unis, les camions entièrement électriques de livraison urbaine permettent de réduire de près de 40 % des émissions de GES comparativement aux camions diesel comme mentionné par (Thomas & Brown, 2013). D'après Thu Tu Thi (2019), « l'électrification du fret urbain est une des mesures envisageables de réduction des émissions de CO₂ du transport de fret mais avec un coût économique très différent selon les camions électriques disponibles ». En outre, il existe des méthodes qui s'appuient sur la technologie verte afin de réduire le rejet de polluants atmosphériques comme la mise en place d'un nouveau moteur moins polluant, l'utilisation de carburants plus propres à faible

teneur en soufre (les carburants diesel émulsifiés, le biodiesel, le gaz naturel comprimé et liquéfié, le gaz de pétrole liquéfié, etc) entre autres l'installation d'un ECT (Emissions Control Technology) ou un DPF (Diesel Particulate Filter) (GloMEEP Project & IAPH, 2018).

Après avoir passé en revue diverses références, il semble que l'application d'un modèle d'évaluation de GES à l'échelle d'un port représente un défi. Par ailleurs, la considération du temps d'attente représente un frein significatif à son évaluation. En outre, les modèles de simulation s'avèrent être les plus couramment employés pour reproduire le comportement réel des camions dans le contexte portuaire. Cependant, leur mise en pratique s'avère complexe, nécessitant des données détaillées et robustes pour appréhender avec justesse l'activité des camions en fonction des diverses contraintes qu'elles soient opérationnelles, géographiques ou liées à la capacité. L'application d'un modèle de GES adaptée à la dynamique des camions se heurte également à de nombreux défis dues à l'hétérogénéité des camions en ce qui concerne l'énergie utilisée, l'âge, la charge transportée, etc. Tous ces facteurs constituent des biais pour les modèles d'évaluation présentés dans la littérature.

Ainsi, nos apports cherchent à élaborer un modèle d'évaluation et de prédiction des émissions, en tenant compte de certaines des contraintes et lacunes identifiées dans les travaux antérieurs. D'une part, nous développons un modèle mathématique pour quantifier les émissions de chaque type de GES selon diverses vitesses. D'autre part, nous élaborons un modèle de simulation pour représenter fidèlement le comportement des camions, en mettant particulièrement l'accent sur leurs périodes d'attente. Cette simulation se nourrit de données réelles concernant les trajets effectués au sein des différentes zones portuaires. En effet, la segmentation du port selon le type de marchandises traitées rend la modélisation du système plus fine, surtout en termes de temps de chargement/déchargement et temps d'attente. En utilisant des analyses ancrées sur des scénarios simulés, notre approche va au-delà d'une simple représentation fidèle du système en place. Elle nous offre la possibilité d'examiner différentes trajectoires possibles pour le futur et d'évaluer l'impact de divers paramètres sur les émissions dans le cadre spécifique que nous analysons.

2.4 Méthodologie

Cette partie détaille la méthodologie adoptée pour construire le modèle d'évaluation et de prédiction des émissions de GES.

Au départ, le périmètre de l'étude est clairement établi, posant ainsi les fondations du projet. Cela implique la délimitation des zones d'étude et la spécification des données à collecter. Par la suite, nous nous consacrons à la collecte et au traitement des données, étapes indispensables pour assurer la qualité et la fiabilité du modèle d'émissions des GES à développer. Les données recueillies sont minutieusement nettoyées et transformées pour une exploitation optimale. Ensuite, la conception des modèles d'évaluation et de simulation est exposée, suivie de leur déploiement concret. Cette phase englobe la caractérisation et la mise en œuvre des paramètres, critères et formules essentiels à l'élaboration des modèles ainsi que la formulation des scénarios destinés à être évalués. En somme, cette section offre une vue synthétique mais complète de la méthodologie. Un schéma récapitulatif qui illustre l'ensemble du cadre méthodologique retenu pour ce travail est présenté par la Figure 1.

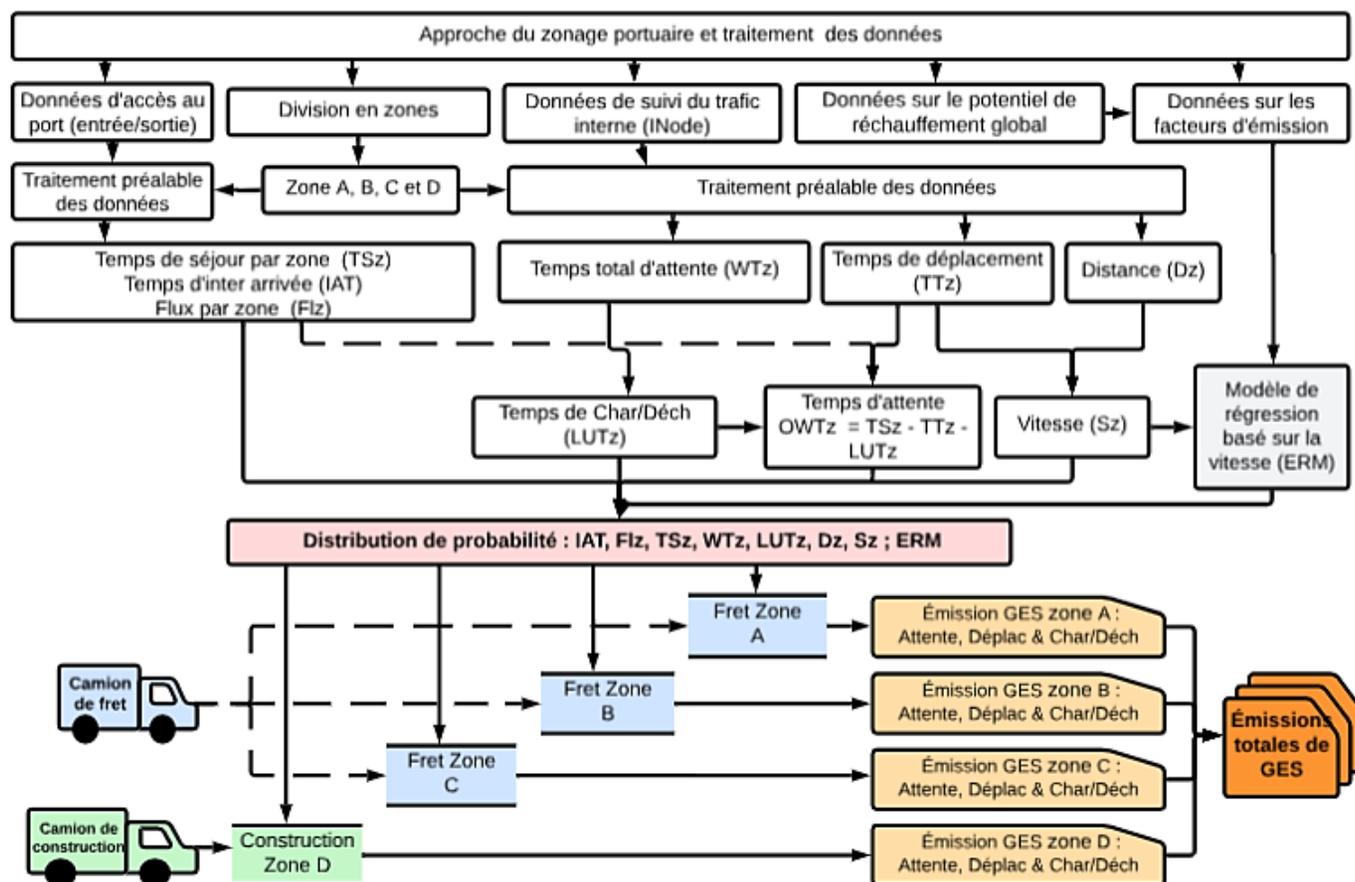


Figure 1: Cadre méthodologique du modèle d'évaluation des émissions de GES.

2.4.1 Zone d'étude

Le port de Trois-Rivières, situé sur la voie maritime du fleuve Saint-Laurent, est un port maritime au cœur d'un vaste réseau intermodal combinant le transport ferroviaire, routier et maritime vers des destinations nationales et internationales. Faisant partie des 17 administrations portuaires canadiennes, créées en 1999 en vertu de la loi maritime du Canada, et actif depuis 1882, le port de Trois-Rivières est un acteur important du développement économique régional pour des secteurs industriels majeurs. Stratégiquement situé à mi-chemin entre Montréal et Québec, comme démontré à la Figure 2, ce port est très sollicité en tant que centre de transbordement diversifié qui traite une

variété de marchandises telles que des produits alimentaires, industriels, forestiers, des biens de consommation et autres fournitures. En effet, chaque année, plus de 43286 camions, 11 000 wagons et 250 navires accèdent au port pour charger ou décharger des marchandises, avec un trafic annuel en constante augmentation dépassant les 3,5 millions de tonnes métriques (Port de Trois-Rivières, 2023). Afin d'augmenter la capacité globale du port, une construction d'un nouveau terminal est prévue sur deux ans. Cette expansion est susceptible d'engendrer une augmentation considérable du trafic et des émissions de GES.

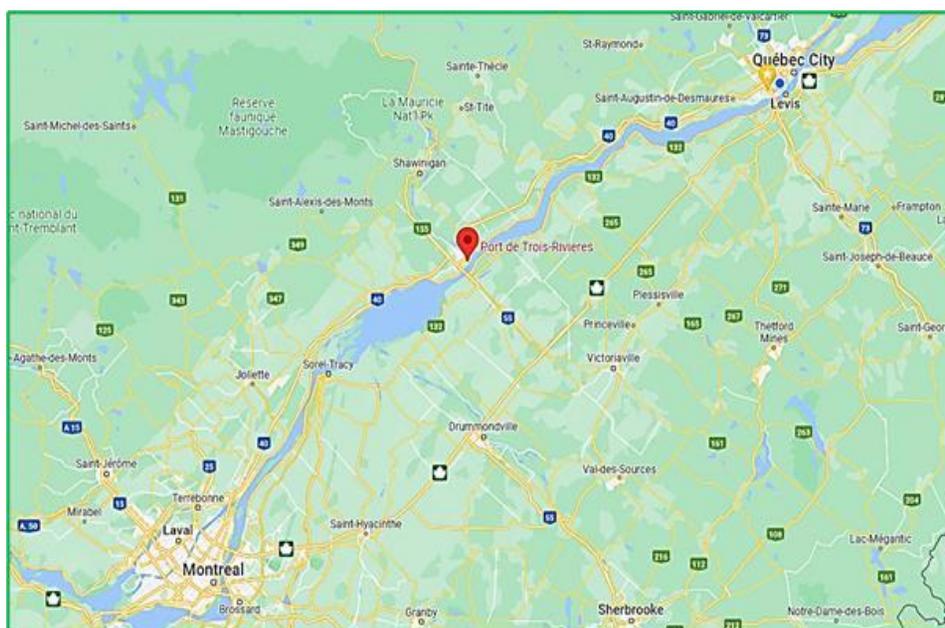


Figure 2: Localisation du port de Trois-Rivières sur le fleuve Saint-Laurent.

Aux fins de cette étude, le port a été considéré comme des zones indépendantes en fonction des types de marchandises traitées dans chaque zone :

- Zone A : Terminal de marchandises générales tels que les composantes d'éoliennes, les transformateurs et les produits forestiers ;
- Zone B : Terminal de grains ;
- Zone C : Terminal de vrac liquide (urée, brai liquide) et solide (acier, aluminium) ;
- Zone D (Terminal 21) : Projet de nouveau terminal prévu pour la période de construction.

Ainsi, il existe actuellement deux portes d'accès au port. La porte d'accès principale (MG) équipée de trois voies d'entrée et d'une de sortie et la porte d'accès secondaire (SG) pourvue d'une voie d'entrée et d'une sortie. Les portes d'accès et les zones sont indiquées dans la Figure 3.

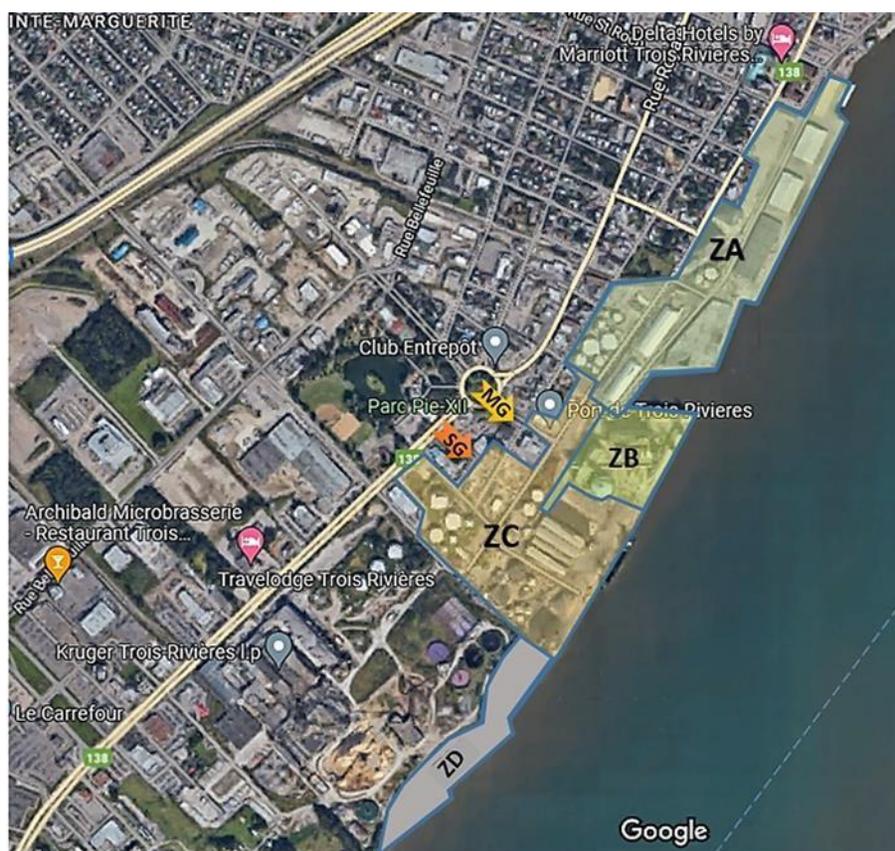


Figure 3: Zonage du ports et portes d'accès.

2.4.2 Collecte, traitement et analyse des données

Les données utilisées pour cette étude proviennent de plusieurs sources. Le premier lot provient des données d'enregistrement d'accès des camions à l'entrée et à la sortie des guérites d'accès. Ces données ont été utilisées pour déterminer la distribution du temps de service des camions dans chaque zone (Tableau 6) ainsi que les flux d'accès par guérite et

le temps d'inter-arrivée des camions. Le deuxième lot est fourni par un système de détecteurs implanté dans différents nœuds placés au niveau des zones du port pour enregistrer le trafic de circulation interne des camions. Ce lot a servi pour reproduire le comportement des camions et les temps d'attente. D'autres données formelles sont recueillies auprès d'autres sources concernant les facteurs d'émission et le potentiel de réchauffement global lié aux différents GES.

2.4.2.1 Données d'accès des camions

Une analyse approfondie des données historiques d'accès des camions entrants et sortants, a permis de sélectionner les années 2017-2019 comme période de référence, précisément pour éviter les biais causés par la période de la pandémie. Ces données comprennent les heures d'entrée et de sortie de chaque véhicule par type (camion, voiture), par porte d'accès (MG, SG) et par mode d'accès (automatique, manuel). Les données d'accès historiques sélectionnées ont été traitées afin d'éliminer les erreurs d'enregistrement et les valeurs extrêmes concernant des véhicules non couverts par notre étude ou des opérations exceptionnelles non liées à l'activité de fret. Une méthode de répartition des camions par zone de destination (A, B, C et D), telle que mentionnée dans la sous-section 2.4.1, a été appliquée pour prendre en compte les spécificités géographiques qui influencent le temps dans le système, la distance parcourue et la vitesse de circulation à l'intérieur du port. Les données historiques d'accès ont été utilisées pour déterminer les distributions de TS et le flux des camions par zone ainsi que leur temps d'inter-arrivée.

- Temps de service (TS)

Le temps de service, appelé aussi le temps de séjour d'un camion, représente la durée pendant laquelle un camion de fret reste à l'intérieur du port depuis son entrée jusqu'à sa sortie via les guérites d'accès. Cette durée englobe à la fois le temps nécessaire au chargement/déchargement (LUT), au déplacement à travers le port (TT), ainsi qu'à l'attente (WT) lors de l'enregistrement ou en file d'attente avant de procéder à l'opération de

chargement/ déchargement. Comme mentionnée précédemment, le TS est déterminé à partir des données d'accès 2017-2019. Les moyennes hebdomadaires de ce temps sont utilisées comme des observations empiriques pour générer les distributions de probabilité associées à chaque zone du port. Par exemple, dans la Zone A, il y a eu un total de 158 observations. La moyenne arithmétique du temps de séjour dans cette zone est de 1,36 heures, avec un écart-type de 0,43 heures. La durée minimale observée du temps de séjour est de 0,53 heures, tandis que la durée maximale observée est de 3,33 heures. De plus, 25% des observations sont inférieures ou égales à 1,12 heures, 50% sont inférieures ou égales à 1,28 heures, et 75% sont inférieures ou égales à 1,56 heures. Les indicateurs statistiques qui concernent le temps de service moyen par semaine pour les trois zones sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2: Statistiques sur la moyenne des TS par semaine pour la période 2017-2019.

	Zone A	Zone B	Zone C
Nombre d'observation	158	158	158
Moyenne (h)	1,36	1,32	1,22
Écart-Type	0,43	0,39	0,31
Min	0,53	0,63	0,69
25%	1,12	1,06	1,01
50%	1,28	1,25	1,16
75%	1,56	1,52	1,33
Max	3,33	3,58	3,06

La représentation de la distribution du TS moyen pour la zone A est illustrée par l'histogramme de la Figure 4 et la boîte à moustaches de la Figure 5.

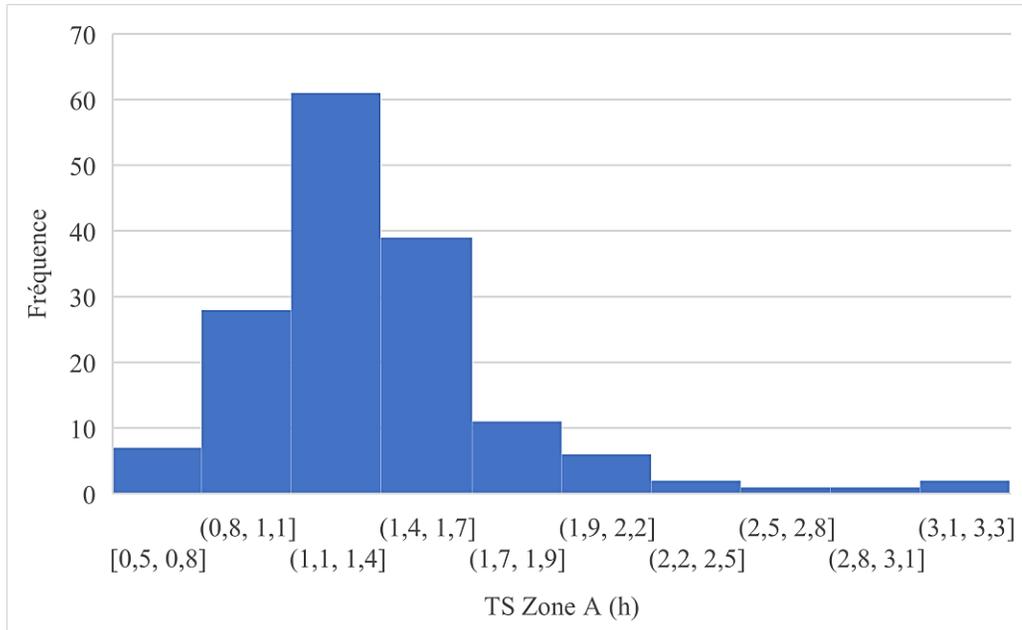


Figure 4: Histogramme du TS moyen pour la zone A.

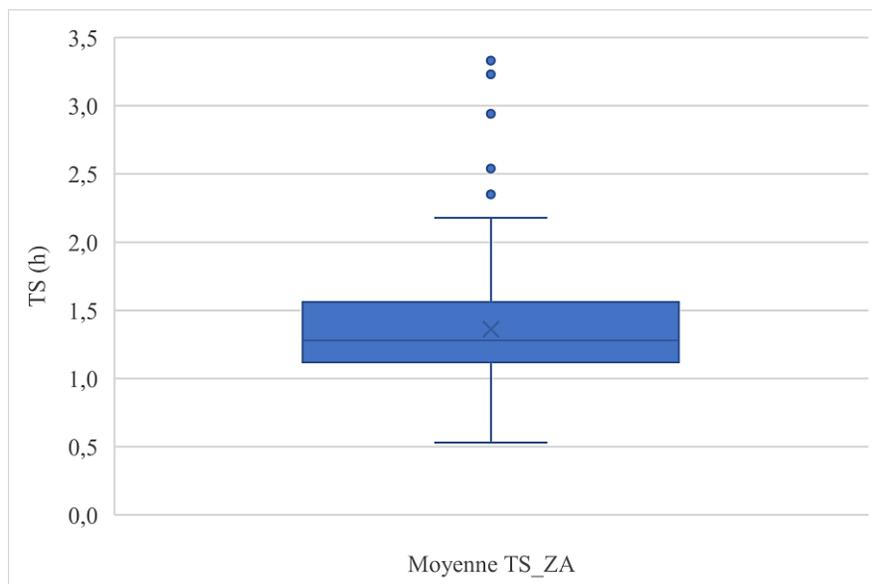


Figure 5: Boîte à moustaches de la dispersion du TS moyen pour la zone A.

La Figure 6 illustre un histogramme représentant la distribution du TS moyen pour la zone B, tandis que la Figure 7 présente cette distribution à travers une boîte à moustaches.

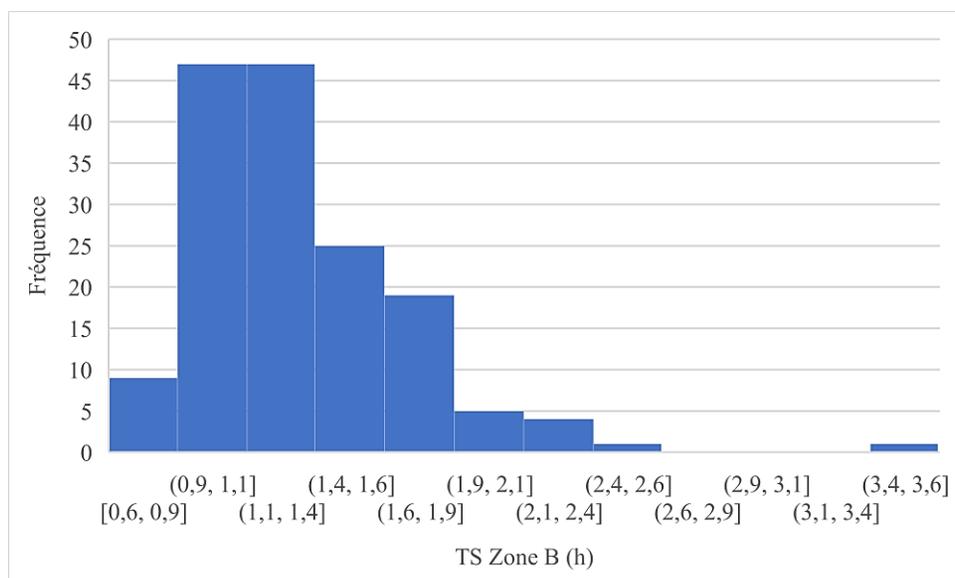


Figure 6: Histogramme du TS moyen pour la zone B.

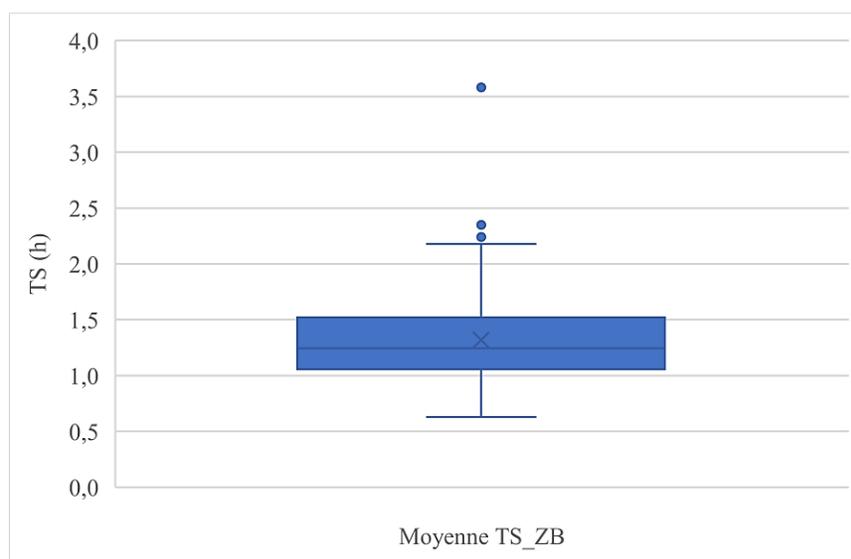


Figure 7: Boîte à moustaches de la dispersion du TS moyen pour la zone B.

La Figure 8 montre un histogramme illustrant la distribution du TS moyen pour la zone C, tandis que la Figure 9 met en avant cette distribution grâce à une boîte à moustaches.

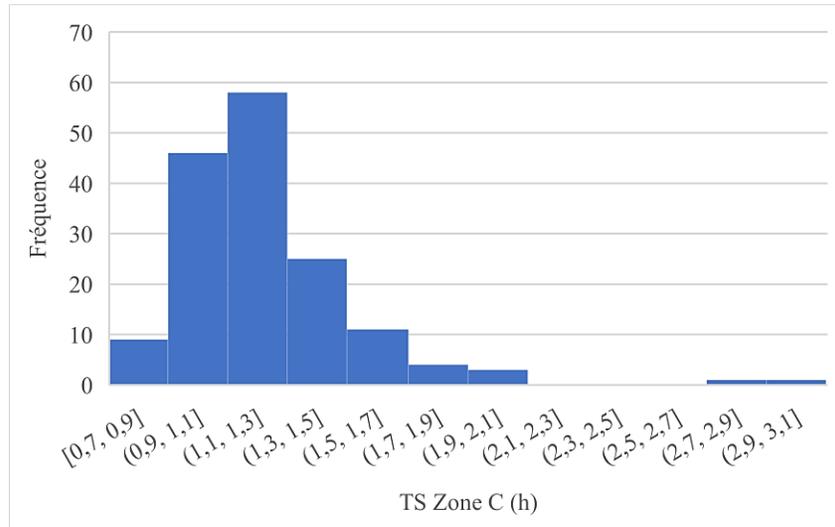


Figure 8:Histogramme du TS moyen pour la zone C.

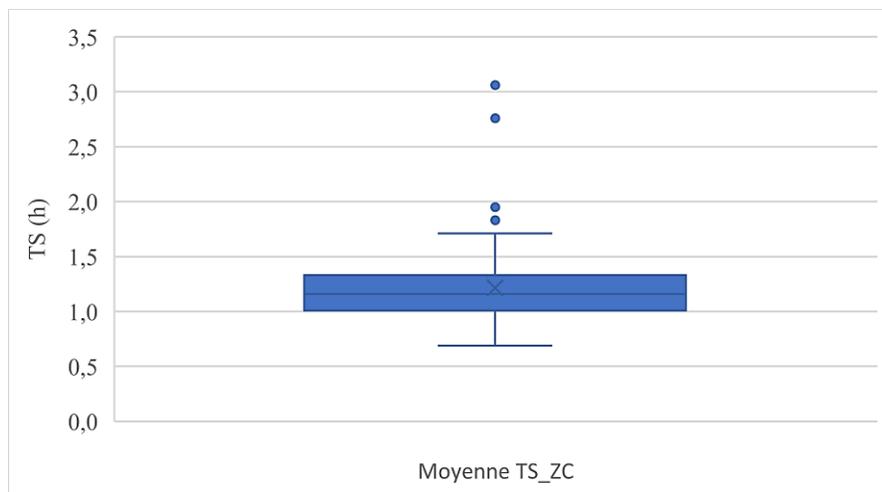


Figure 9:Boîte à moustaches de la dispersion du TS moyen pour la zone C.

L'analyse des histogrammes et des boîtes à moustaches des TS montre l'existence de plusieurs valeurs extrêmes pour les trois zones. Cette variabilité peut facilement affecter la convergence du modèle en raison de la corrélation entre le temps de service et les autres fragments de temps dans le système. C'est pourquoi nous avons procédé à un traitement des données pour limiter la variabilité du TS entre les quartiles Q1 (la valeur la plus petite de la série et au-dessous de laquelle se trouvent 25 % de valeurs de la série lorsqu'elles

sont arrangées en ordre croissant) et Q3 (la valeur la plus petite de la série et au-dessous de laquelle se trouvent 75 % de valeurs de la série lorsqu'elles sont arrangées en ordre croissant). Cet ajustement nous a permis de déterminer les distributions de probabilité les plus appropriées au TS dans chaque zone, comme illustré dans les Figures 10, 11 et 12 pour la zone A, B et C respectivement. Pour la zone D, le TS est estimé, sur la base des données fournies par l'autorité portuaire lors d'une simulation antérieure, à une heure en moyenne incluant 20 min pour le chargement/déchargement.

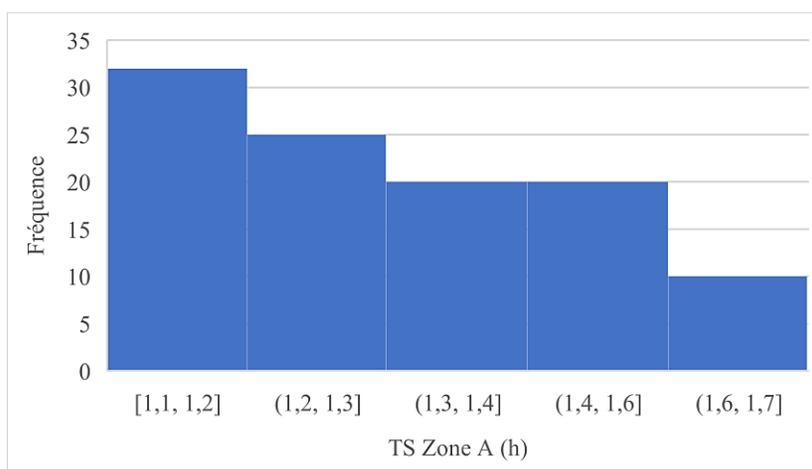


Figure 10:Histogramme du TS ajusté pour la zone A.

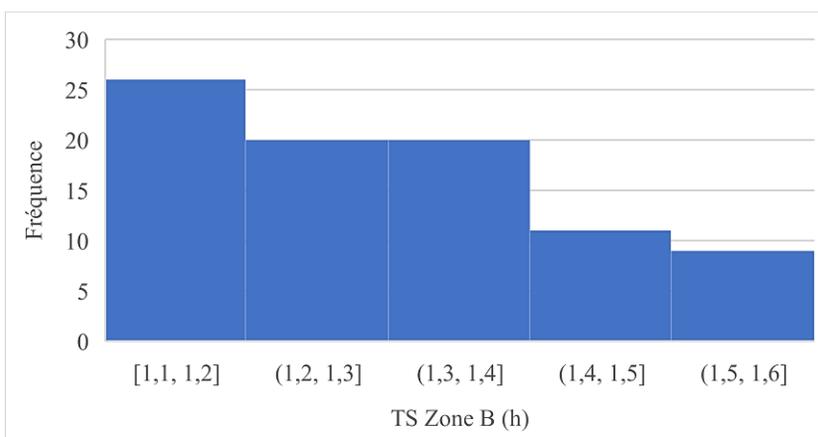


Figure 11:Histogramme du TS ajusté pour la zone B.

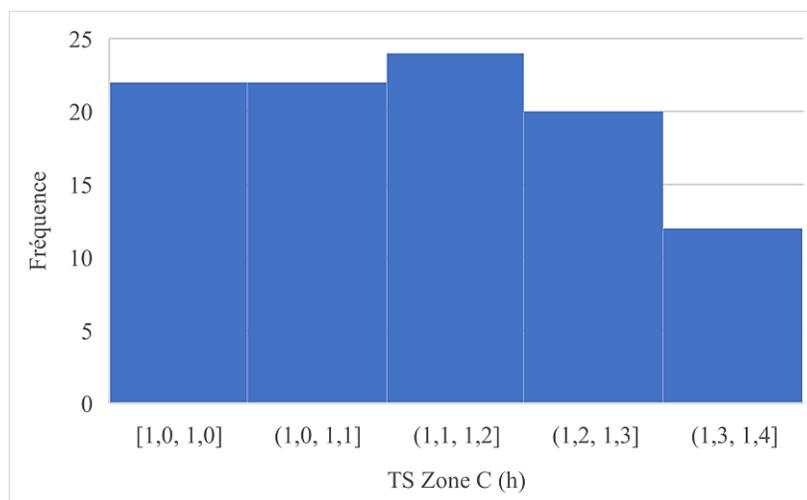


Figure 12: Histogramme du TS ajusté pour la zone C.

- Intervalle entre arrivées et flux de camions par point d'accès

Le temps inter-arrivée (TIA) est la durée qui sépare deux arrivées consécutives de camions. Ce paramètre est déterminé en fonction du flux journalier calculé à partir du nombre moyen de camions visitant le port par an (moyenne de la période de référence 2017-2019). D'après les données fournies par l'autorité portuaire, le nombre moyen de camions de marchandises par jour s'élève à 118 camions contre 145 camions de construction. Ainsi, le TIA permet de déterminer pour chaque camion (fret ou construction) le flux par point d'accès. En se référant aux données, on constate que 72% des camions passent par la guérite principale. Le reste des camions, soit 28%, fréquente le port à travers la guérite secondaire.

2.4.2.2 Collecte de données iNode

Comme mentionnée précédemment, notre deuxième source de données provient des capteurs radar de réidentification (iNode), une technologie associée aux camions connectés. Ces données brutes fournies par le système d'information portuaire, sont d'une importance majeure en raison des schémas de trafic interne qu'elles contiennent. Environ 29 capteurs ont été installés à travers divers points stratégiques des zones portuaires pour

surveiller le trafic des camions, comme le montre la Figure 13. Toutefois, les observations recueillies par iNode se limitent aux zones A et C. De ce fait, des estimations seront faites pour les zones B et D.



Figure 13: Répartition des capteurs au sein des zones portuaires
(Source : <https://www.smatstraffic.com>).

Les données brutes obtenues décrivent les parcours empruntés par les camions (3650 itinéraires au total). Chaque observation représente le chemin suivi par un camion spécifique. Ce chemin contient une série de nœuds avec le temps d'attente associé ainsi que le temps de déplacement passé entre chaque paire de nœuds. Le Tableau 3 affiche un exemple de données brutes, tandis que la Figure 14 illustre l'itinéraire correspondant. Les points E, F, G et H représentent les nœuds de cet itinéraire.

Tableau 3: Exemple d'une observation avec les données brutes recueillies par le système de suivi et celles calculées.

	Trajectoire	Temps d'attente	Temps de déplacement
Données brutes	MG → E → F → G → H → G → F → E → MG	0:01:06 --> 0:00:00 --> 0:01:49 --> 0:00:00 --> 0:00:06 --> 0:09:35 --> 0:01:57 --> 0:00:08 --> 0:00:00	0:02:09 --> 0:01:48 --> 0:01:11 --> 0:00:28 --> 0:00:43 --> 0:01:40 --> 0:02:25 --> 0:00:57
Données calculées	1,62 km	WT = 0,25 h LUT = 0,16 h	0,189 h

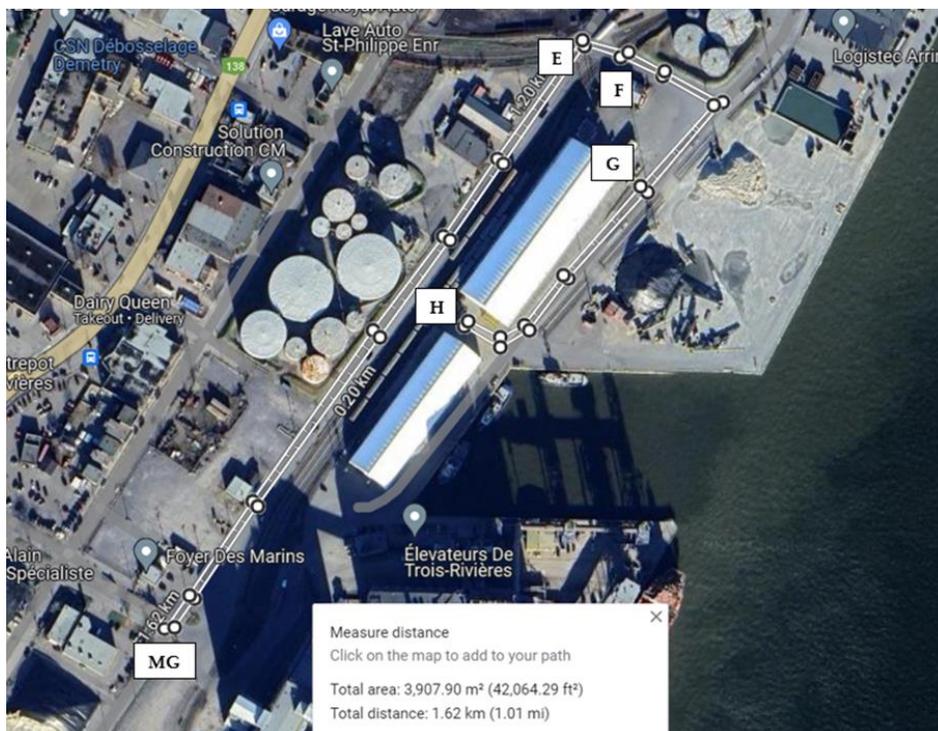


Figure 14: Illustration des nœuds parcourus selon l'exemple du Tableau 3.

Un traitement avancé basé sur des analyses, des outils statistiques et des programmes informatiques a été consacré aux données iNode afin de déduire les paramètres décrivant le profil du trafic des camions dans les différentes zones du port. Les différentes étapes de traitement sont expliquées ci-dessous. Pour commencer, une première étape de traitement des données a consisté à déterminer pour chaque itinéraire :

- La zone associée ;
- Le temps de déplacement désigné comme le *travelling time* (TT) ;
- La distance parcourue ;
- La vitesse moyenne ;
- Le temps de chargement/déchargement désigné par le *loading/unloading time* (LUT) ;
- Le temps d'attente désigné par le *waiting time* (WT) qui comprend le LUT et les autres temps d'attente désigné par le *overall waiting time* (OWT).

La zone de chaque circuit est déterminée à partir de l'emplacement de l'ensemble des nœuds qui le composent. Ainsi, l'exemple d'itinéraire d'un camion, cité dans le Tableau 3, correspond clairement à la zone A. Les autres paramètres susmentionnés sont calculés en parcourant les nœuds et les arcs de chaque route comme indiqué ci-dessous :

- $TT =$ somme des temps entre les nœuds traversés ;
- Distance = somme des distances entre les nœuds traversés ;
- Vitesse = distance/temps du trajet ;
- WT = somme des temps enregistrés dans les nœuds visités ;
- LUT = le temps d'attente le plus élevé dans un circuit ;
- $OWT = WT - LUT$;
- $TS = LUT + WT + TT$;

Ces formules ont été appliquées sur l’itinéraire présenté dans le Tableau 3, les résultats sont cités dans le Tableau 4.

Tableau 4:Évaluation des paramètres basée sur l'exemple du Tableau 3.

Paramètre	Valeurs
Durée du trajet	0,189 h
Distance	1,62 km
Vitesse	8,57 km/h
Temps d'attente global	0,25 h
Temps de chargement/déchargement	0,16 h
Autre temps d'attente	0,09 h
Temps dans le système	0,5 h

Les résultats, après le premier traitement des données iNode sont illustrés dans le Tableau 5. Par exemple, pour un total de 3650 observations, la moyenne de la distance parcourue est établie à 2,0 km, L'écart-type, quant à lui, est de 2,2 km, Par ailleurs, les données révèlent des valeurs étendues de distances, allant de 0 km, qui représente la plus petite distance, à 49,7 km, qui constitue la plus grande distance relevée. En examinant les quartiles, nous observons que le premier quartile (Q1) est à 0,7 km, ce qui signifie que 25% des observations ont une distance inférieure ou égale à cette valeur. La médiane (Q2), située à 1,5 km, indique que 50% des observations ont une distance inférieure ou égale à ce seuil. Enfin, le troisième quartile (Q3), établi à 2,5 km, révèle que 75% des observations ont une distance inférieure ou égale à cette valeur.

Tableau 5: Statistiques descriptives des données après la première étape de traitement.

	Distance (km)	Temps (min)		
		LUT	TT	WT
Nombre	3650	3650	3650	3650
Moyenne	2,0	34,7	12,4	57,5
Écart-type	2,2	30,8	31,1	42,7
Min	0	0	0	0
25%	0,7	13,2	1,1	28,3
50%	1,5	27,9	2,2	46,3
75%	2,5	43,5	10,1	74,7
Max	49,7	213,6	678,6	340,2

L'importante variabilité des valeurs des paramètres exige une analyse détaillée afin de filtrer les observations présentant des écarts significatifs par rapport à une activité de fret habituelle. Par exemple, des vitesses proches de zéro représentent des routes avec des micro-attentes. Cela peut indiquer qu'il y a des ralentissements ou des attentes très courtes, par exemple, des périodes de congestion mineures. À l'inverse, des vitesses trop élevées peuvent font référence à des vitesses de déplacement des camions qui sont anormalement rapides. Cela peut indiquer une erreur dans la détection des camions, notamment si les vitesses enregistrées sont beaucoup plus élevées que la normale pour un camion sur cette route donnée. Pour remédier à ces anomalies, une approche de traitement, basée sur des règles statistiques, a été optée pour sélectionner les observations pertinentes et les distributions de probabilité pour chaque paramètre.

- Temps de chargement/déchargement (LUT)

Comme mentionné auparavant, le LUT est estimé comme étant le temps d'attente le plus long observé dans un nœud appartenant à une route concernée. Ce paramètre peut représenter des valeurs aberrantes, notamment lorsqu'il se superpose à des attentes autres que celles liées au chargement ou au déchargement. Les graphiques en boîte à moustaches illustrés dans les Figures 15 et 16 mettent en évidence la distribution des données de temps de LUT pour les zones A et C respectivement. Ces graphiques montrent également l'existence des valeurs hors normes pour chacune des zones.

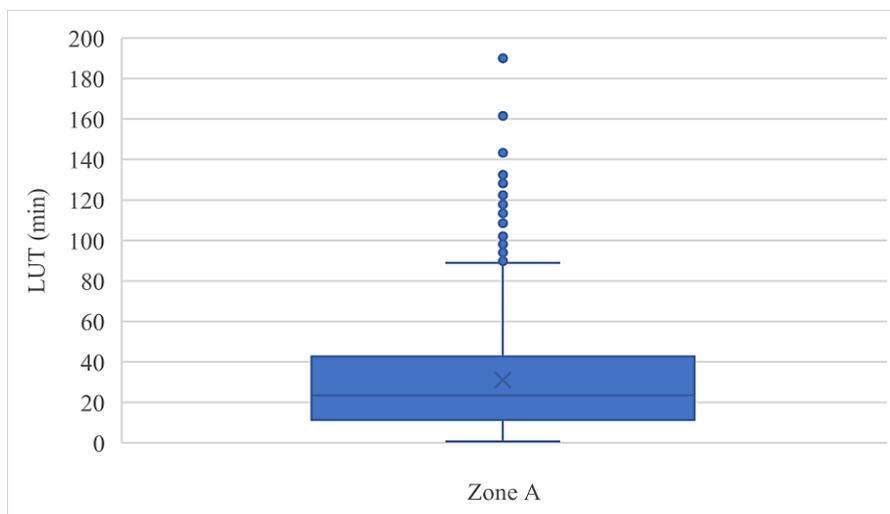


Figure 15: Boîte à moustaches de la dispersion de LUT pour la zone A.

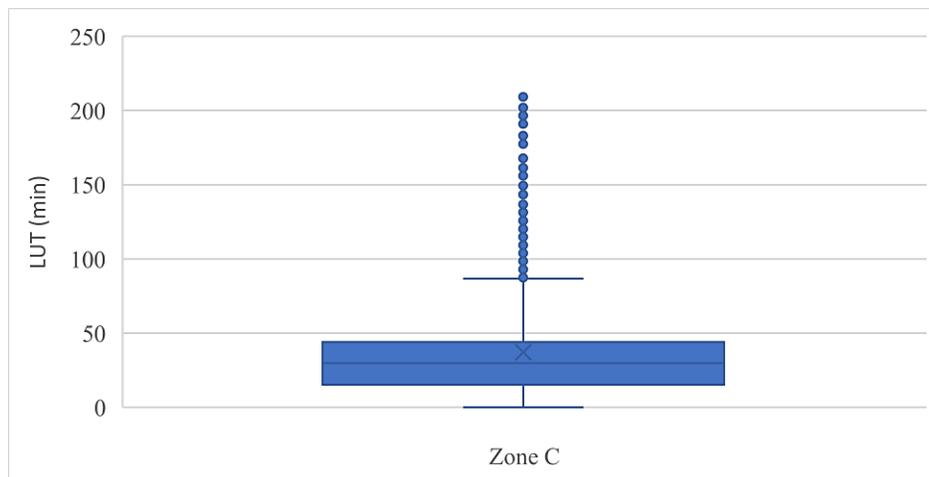


Figure 16:Boîte à moustaches de la dispersion de LUT pour la zone C.

L'ajustement des observations du LUT consiste à limiter les valeurs entre $Q1-1,5IQR$ et $Q3+1,5IQR$ conformément aux règles statistiques de l'écart interquartile utilisées pour éliminer les valeurs aberrantes, où $Q1$ et $Q3$ sont les valeurs respectives du premier et du troisième quantile ($Q1$ est la valeur en dessous de laquelle 25 % des données se situent, tandis que $Q3$ est la valeur en dessous de laquelle 75 % des données se trouvent) et IQR est la valeur de l'inter-quantile ($Q3-Q1$). Les observations obtenues pour la zone A et C après l'ajustement sont présentées respectivement par les Figures 17 et 18.

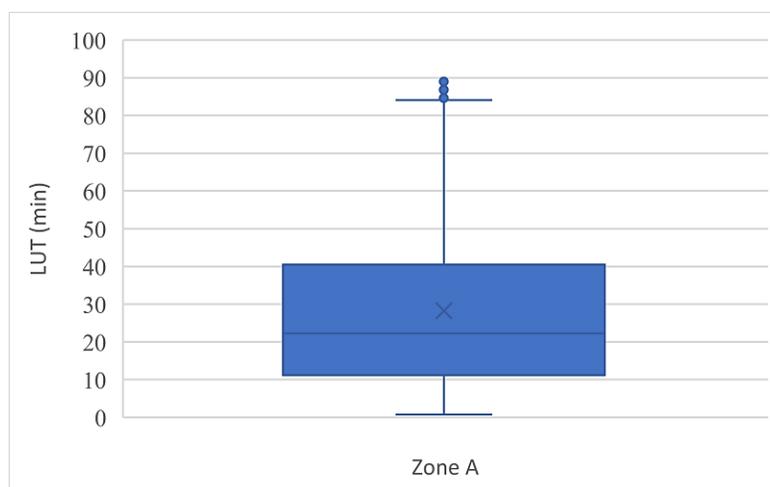


Figure 17:Boîte à moustaches illustrant la distribution du LUT de la zone A après ajustement.

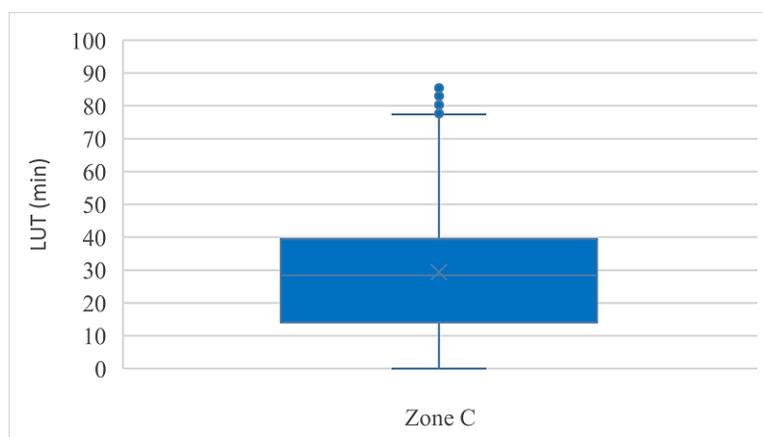


Figure 18:Boîte à moustaches illustrant la distribution du LUT de la zone C après ajustement.

Les résultats du temps de chargement/déchargement pour les zones A et C sont validées par une étude empirique produite en 2017 à l'Université du Québec à Trois-Rivières (Goudreau et al., 2017). Les paramètres de la zone B sont déterminés à partir de la même étude avec un minimum de 6 min, un maximum de 17 min et une moyenne de 10 min. Concernant la zone D, les paramètres du LUT varie entre 15 et 25 min avec 20 min comme moyenne. Ces données sont fournies par l'administration portuaire.

- Vitesse

Comme le montrent les Figures 19 et 20, les vitesses des camions à la zone A et C présentent des valeurs aberrantes qui peuvent correspondre à des petites ou à des grandes vitesses.

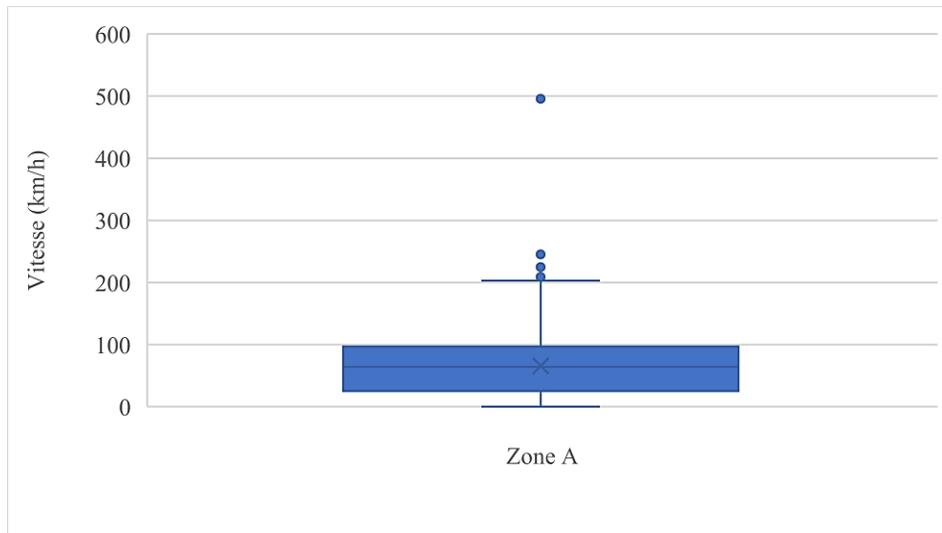


Figure 19:Boîte à moustaches de la dispersion de la vitesse pour la zone A.

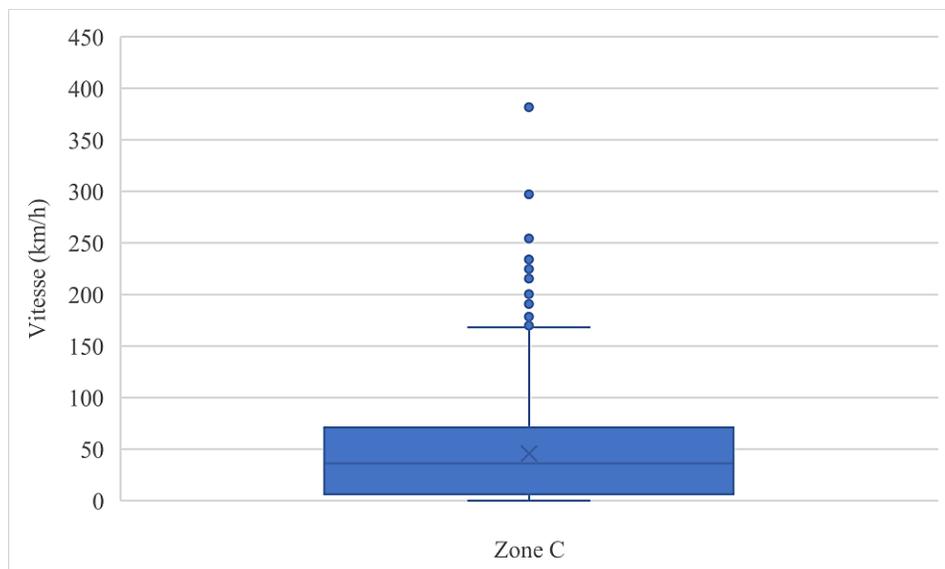


Figure 20:Boîte à moustaches de la dispersion de la vitesse pour la zone C.

La première étape d'ajustement consiste à suivre la même règle statistique que celle annoncée pour le LUT. Le résultat de cet ajustement est illustré par les histogrammes de la Figure 21 et 22.

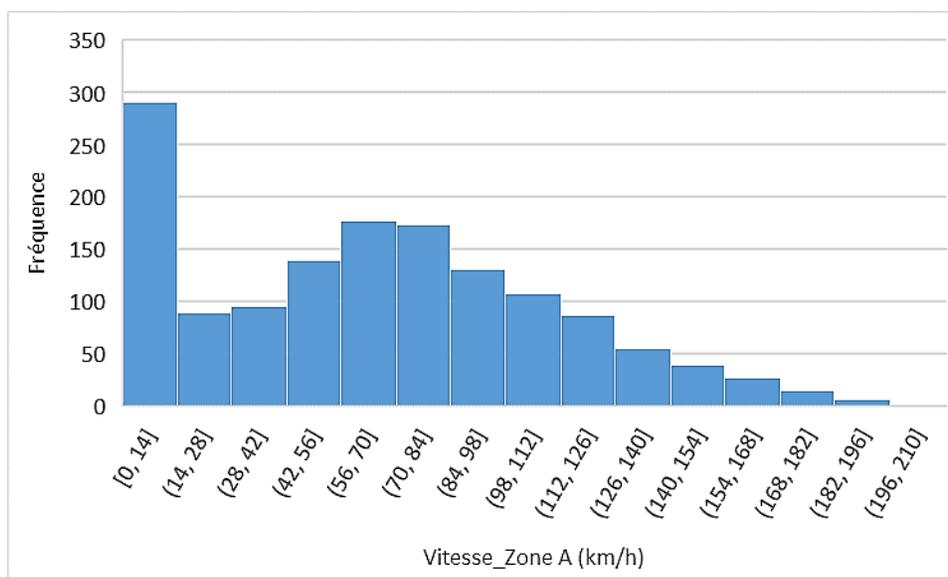


Figure 21: Histogramme des observations de vitesse pour la zone A après le premier ajustement

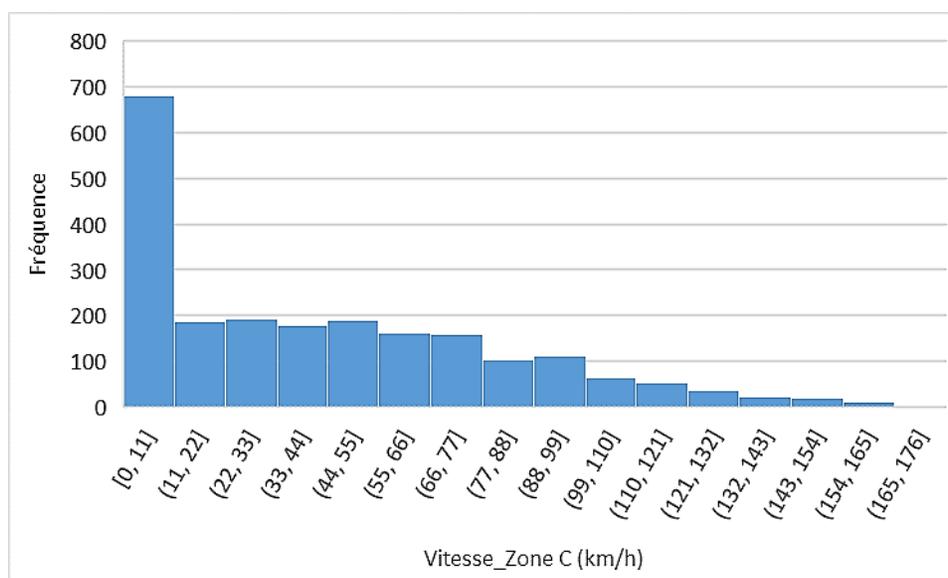


Figure 22: Histogramme des observations de vitesse pour la zone C après le premier ajustement.

Cependant, pour éviter des vitesses proches de zéro ou des valeurs extrêmes qui dépassant le troisième quantile, on estime qu'il faut ajuster la vitesse entre 5 km/h (vitesse de marche) et 50 km/h (vitesse de circulation en zone urbaine), sachant que le règlement intérieur du port de Trois-Rivières limite la vitesse à 30 km/h. Les Figures 23 et 24 illustrent la distribution des fréquences obtenues successivement pour les deux zones. Pour la zone B, la vitesse adoptée est la moyenne des vitesses des zones A et C, tandis que pour la zone D, la vitesse est la même que celle de la zone A étant donné les distances moyennes similaires à partir des entrées du port pour les deux zones.

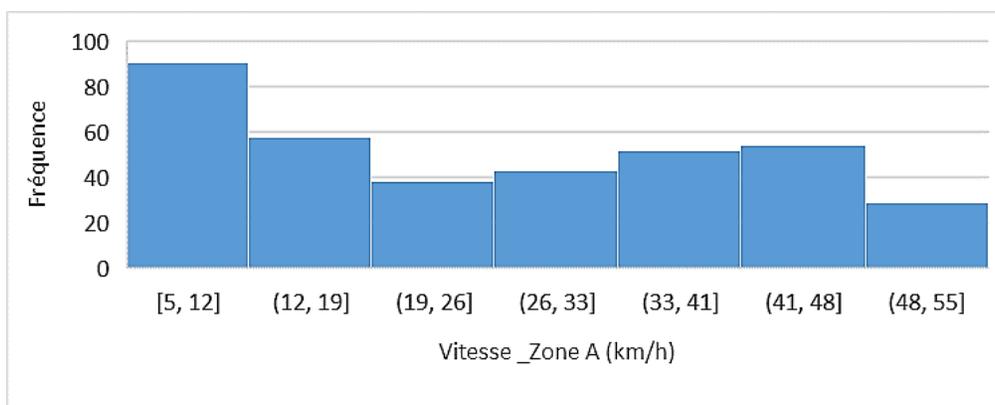


Figure 23: Histogramme des observations de vitesse pour la zone A après le deuxième ajustement.

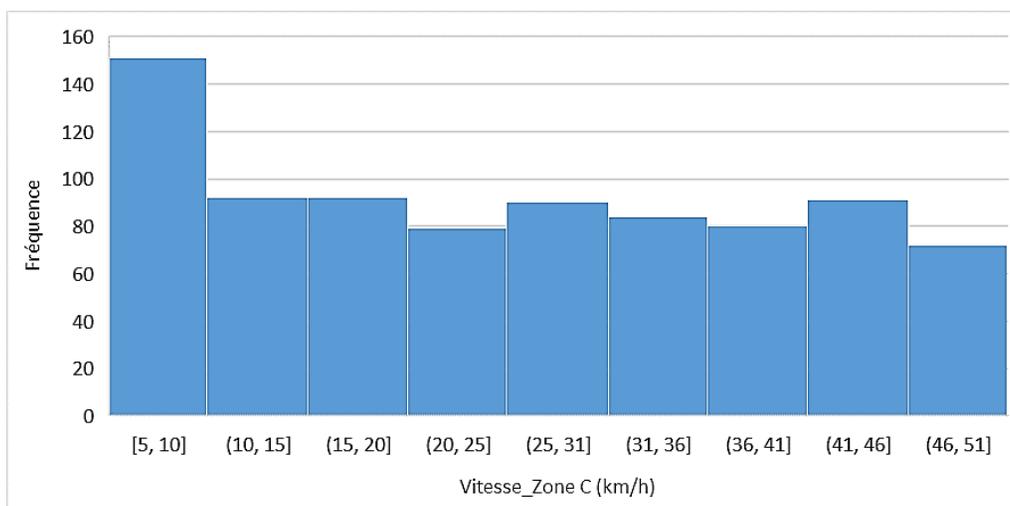


Figure 24: Histogramme des observations de vitesse pour la zone C après le deuxième ajustement.

- Distance

La distance des trajectoires présente également des aberrations qui peuvent être dues aux activités opérationnelles internes du port. Ces aberrations sont décrites dans les Figures 25 et 26.

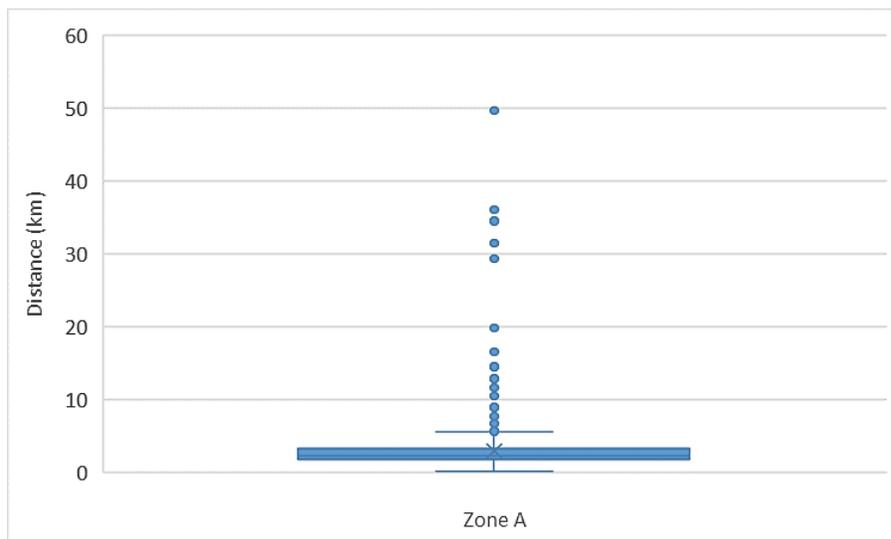


Figure 25:Boîte à moustaches illustrant la dispersion de la distance pour la zone A.

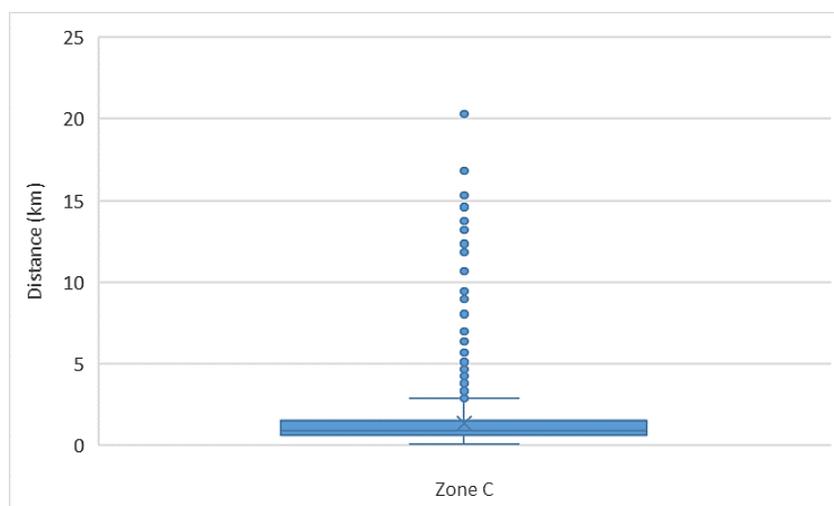


Figure 26:Boîte à moustaches illustrant la dispersion de la distance pour la zone C.

L'application de la règle statistique de l'ajustement interquartile a permis de résoudre ce problème. Les Figures 27 et 28 montrent le résultat obtenu après ajustements de de la distance pour les zones A et C.

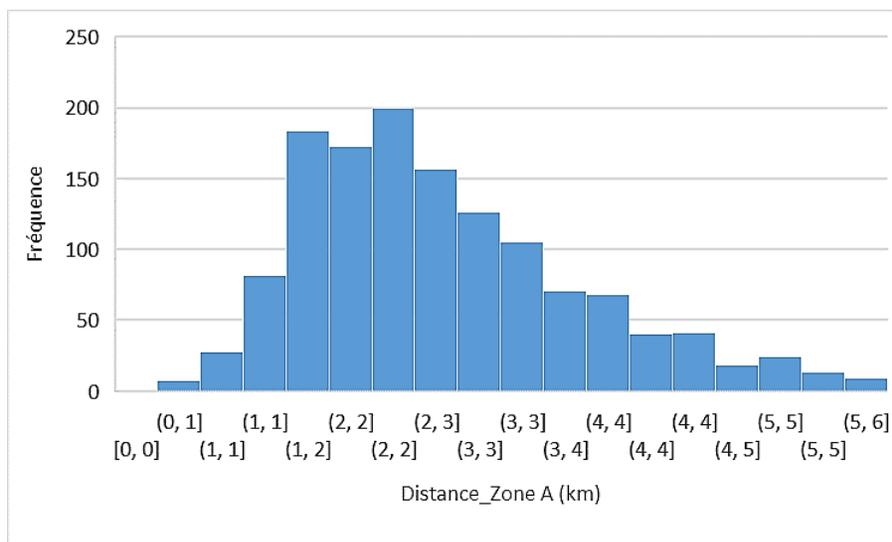


Figure 27: Histogramme des observations de la distance pour la zone A après ajustement.

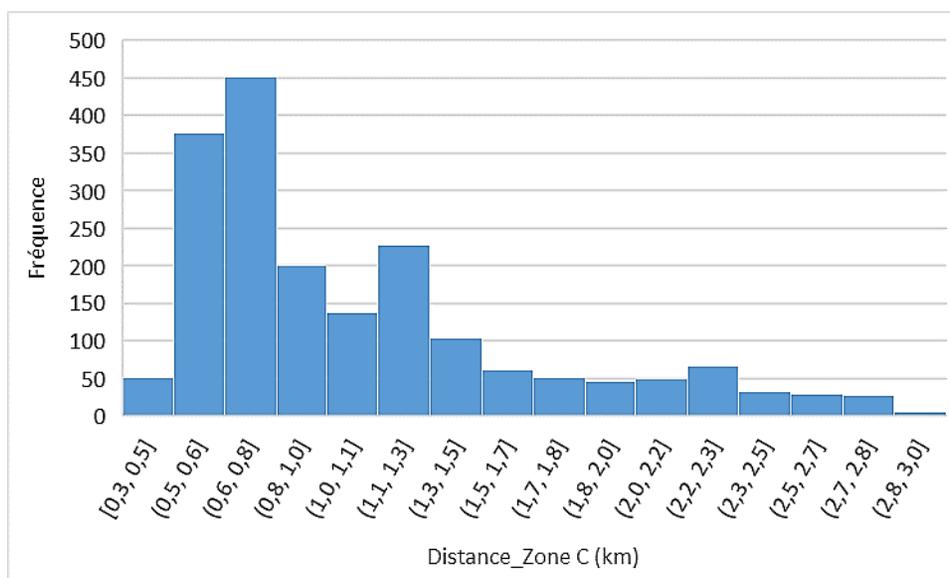


Figure 28: Histogramme des observations de la distance pour la zone C après ajustement.

Ainsi, les distances pour les zones B et D ont été déterminées à partir de mesures approximatives sur Google Maps de l'itinéraire spécifique que doivent suivre les camions visitant ces zones. La Figure 29 illustre l'itinéraire identifié pour la zone B dans un déplacement aller-retour. La Figure 30 montre une simulation visuelle du Terminal 21 (zone D) projeté.

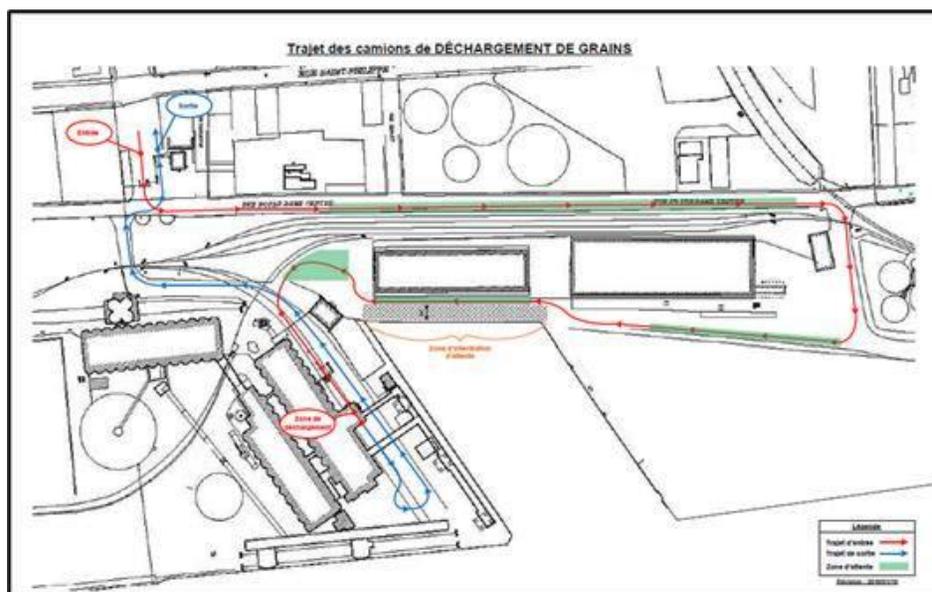


Figure 29: Itinéraire de la zone B en aller-retour (Source : Goudreau et al., 2017).

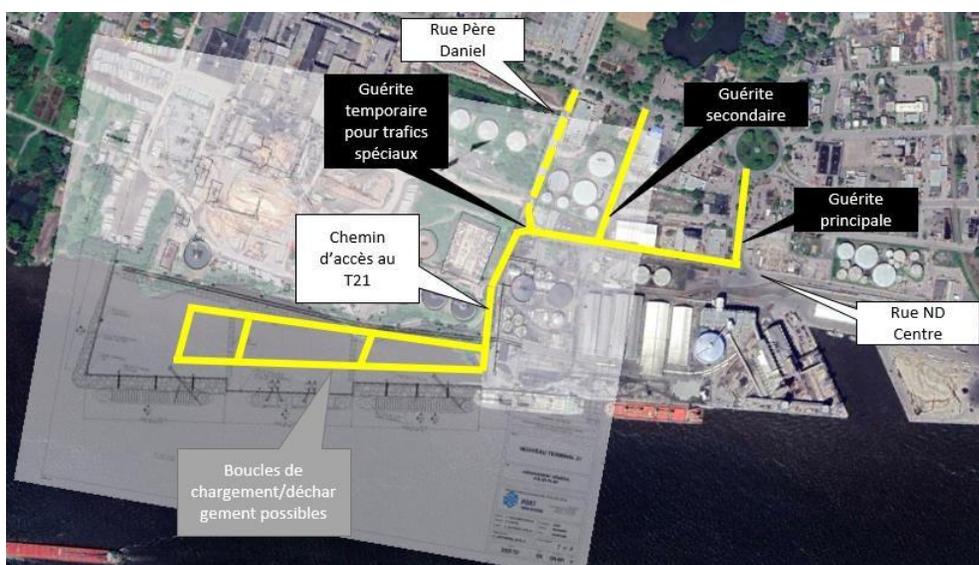


Figure 30: Itinéraires prévus des camions pour le Terminal 21 (zone D).

Les observations ajustées sont utilisées à l'aide de Python pour générer les courbes de distributions de probabilité pour les différents paramètres. En résumé, six distributions de probabilité ont été employées pour représenter les données, comme le montre le Tableau 6. Les distributions de probabilité pour les zones A et C sont respectivement détaillées dans les Tableaux 7 et 8.

Tableau 6: Distribution de probabilité adoptée pour les paramètres de modélisation.

Distributions de probabilité				
Zone	TS	LUT	Distance	Vitesse
A	Uniforme	Gamma	Triangulaire	Uniforme
B	Log-Normale	Triangulaire	Normale	Uniforme
C	Weibull	Gamma	Gamma	Uniforme
D	Uniforme	Triangulaire	Normale	Uniforme

Tableau 7: Distributions de probabilité pour la zone A.

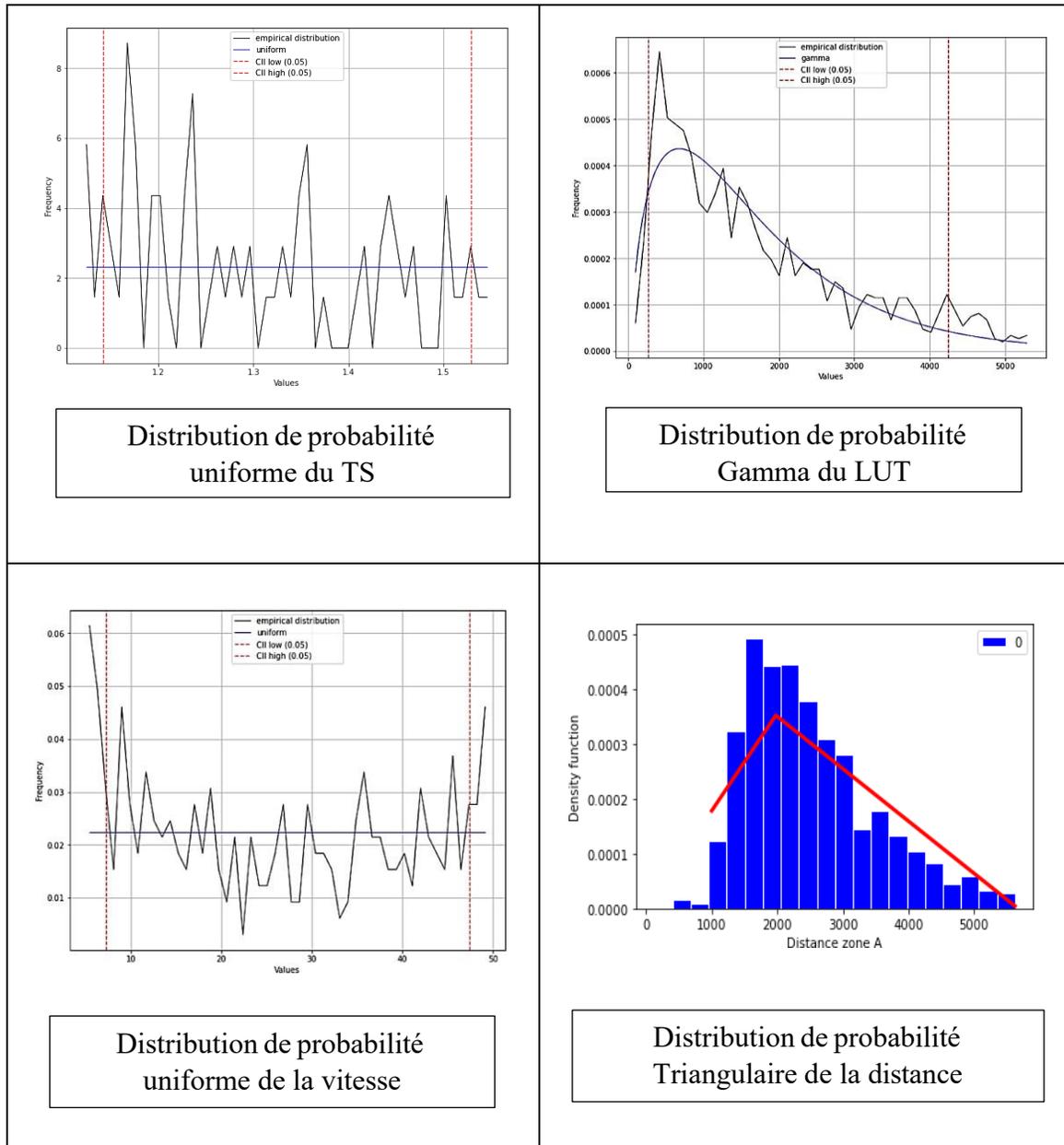
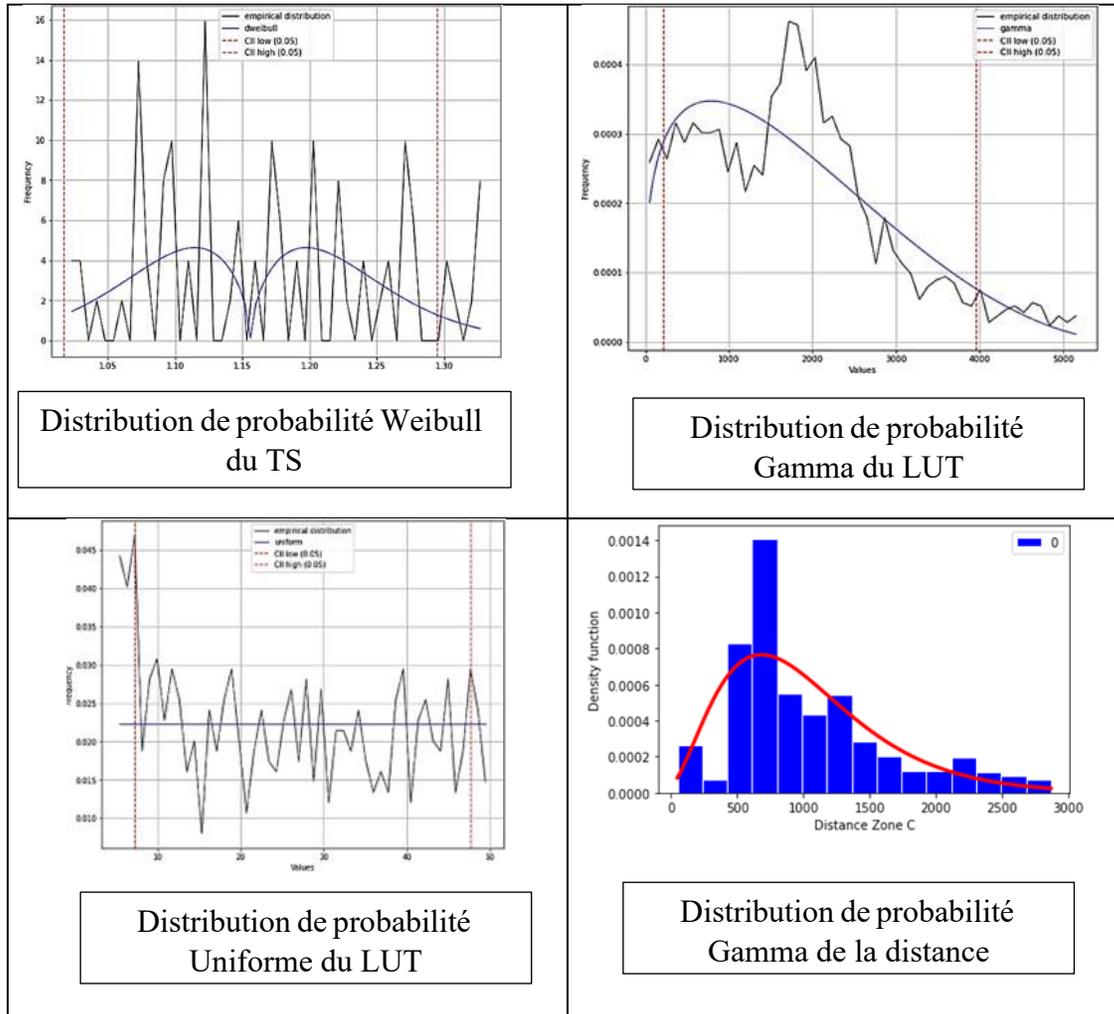


Tableau 8: Distributions de probabilité pour la zone C.



2.4.3 Modèle d'émission GES

2.4.3.1 Modèle de GES basé sur la vitesse

Cette section fournit une description du développement du modèle d'émissions de GES. L'objectif principal de ce modèle est d'évaluer les émissions dues aux camions en fonction de leur comportement dans le port. À partir du moment où un camion de marchandises entre dans le port, il se retrouve soit en mode attente, soit en mode déplacement. Les

attentes englobent deux états : le chargement/déchargement et les autres attentes où le camion est soumis à une file d'attente à l'intérieur du port avant d'être servi.

Pour quantifier les émissions de GES, nous nous sommes inspirés de la méthode adoptée par le port de Long Beach, San Pedro (Starcrest Consulting Group LLC, 2021) qui associe la vitesse aux émissions par catégorie de GES pour chaque intervalle de vitesse de 5 miles par heure, comme le montre le Tableau 9. Pour notre cas, nous considérons les trois principaux GES à l'origine de réchauffement climatique (CO₂, CH₄ et N₂O) (MELCC, 2023).

Tableau 9: Émissions des camions par catégorie de GES en fonction de la vitesse
(Source: Starcrest Consulting Group, LLC, 2021).

Vitesse (mph)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Unité
0	6082	0,6750	0,8982	g/h
5	3691	0,4985	0,5912	g/mi
10	3176	0,3279	0,5082	g/mi
15	2609	0,1929	0,4168	g/mi
20	2275	0,1349	0,3633	g/mi
25	2051	0,1027	0,3273	g/mi
30	1880	0,0821	0,3000	g/mi
35	1748	0,0679	0,2788	g/mi
40	1649	0,0576	0,2630	g/mi
45	1580	0,0498	0,2519	g/mi
50	1539	0,0439	0,2453	g/mi
55	1525	0,0392	0,2429	g/mi
60	1549	0,0390	0,2467	g/mi
65	1607	0,0391	0,2558	g/mi
70	1607	0,0391	0,2558	g/mi

À partir de ce tableau, nous avons effectué l'agrégation des différents GES en GES équivalent CO₂/mile. Pour convertir le modèle d'émissions décrit par le Tableau 4 vers un modèle en unités équivalentes en CO₂, nous avons utilisé les valeurs du potentiel de réchauffement global pour chaque type de GES telles que déterminées par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) : les émissions de CO₂, de CH₄ et de N₂O sont multipliées par 1, 25 et 298 respectivement. Ensuite, plusieurs modèles de régression ont été expérimentés pour interpoler les points d'intervalle discrets pour différentes valeurs de vitesse $s_t = (0, \dots, 70)$ mph par un camion t afin de produire une courbe lisse montrant une corrélation continue entre la vitesse et les émissions. Un modèle polynomial du quatrième degré a été retenu et ajusté avec un coefficient de détermination de 0,985 établissant la corrélation entre la vitesse et l'émission en équivalent CO₂ comme le démontre l'équation (1).

$$F(s_t) = 0.0012s_t^4 - 0.2113s_t^3 + 13,521s_t^2 - 392,35s_t + 6293,5 \quad (1)$$

Avec :

$F(s_t)$ désigne les émissions de GES par heure ($s_t = 0$) ou par mile ($s_t > 0$) selon la vitesse du camion.

Le modèle ajusté est représenté dans la Figure 31, et il est valable de la vitesse zéro, lorsque le camion est à l'arrêt, jusqu'à 70 miles lorsque le camion est en mouvement. Ainsi, il est appliqué à chaque heure pour l'état d'attente et à chaque kilomètre parcouru pour l'état de déplacement.

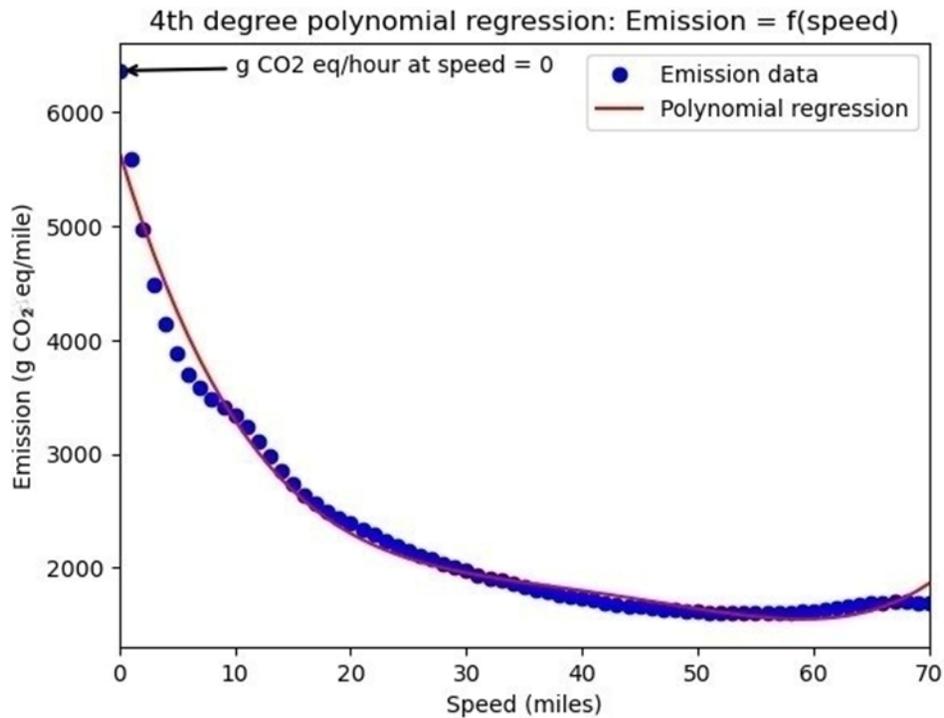


Figure 31:Modèle de régression polynomiale des émissions basé sur la vitesse.

2.4.3.2 Modèle d'émission GES globale

Les émissions mondiales produites par le trafic de camions dans le port sont calculées par l'équation (2).

$$GHG_{GES} = \sum_z \sum_t E_{tr_{t,z}} + \sum_z \sum_t E_{w_{t,z}} ; z = Zone A, B, C et D; t = camion 1, 2..n \quad (2)$$

Avec :

GHG_{GES} Désigne les émissions globales de GES émis par les camions visitant le port.

$E_{tr_{t,z}}$ Désigne les émissions de déplacement du camion t dans la zone z .

$E_{w_{t,z}}$ Désigne les émissions d'attente du camion t dans la zone z .

Les émissions de déplacement (équation (3)) sont définies comme étant le produit de la distance parcourue en miles et de l'émission de vitesse de déplacement déterminée selon la formule (1).

$$E_{tr_{t,z}} = F(s_t)D_{t,z}, s_t > 0 \quad (3)$$

Avec :

$D_{t,z}$ Dénote la distance parcourue en miles par le camion t dans la zone z .

Les émissions d'attente (équation (4)) sont définies comme étant le produit de temps d'attente du camion et de l'émission de vitesse de déplacement déterminée selon la formule (1). Le temps d'attente totale est la somme de temps de chargement/déchargement et les autres temps d'attente (Équation (5)). Ce dernier est calculé en retranchant du temps de service, tel que démontré dans la formule (6), la somme du temps nécessaire au chargement/déchargement et du temps de déplacement.

$$E_{w_{t,z}} = F(s_t)WT_{t,z}, s_t = 0 \quad (4)$$

$$WT_{t,z} = LUT_{t,z} + OWT_{t,z} \quad (5)$$

Avec :

$WT_{t,z}$ Dénote le temps d'attente enregistré en h par le camion t dans la zone z

$LUT_{t,z}$ Dénote le temps de chargement/déchargement enregistré par le camion t dans la zone z .

$$OWT_{t,z} = TS_{t,z} - LUT_{t,z} - TT_{t,z} \quad (6)$$

Avec :

$OWT_{t,z}$ Dénote l'autre temps d'attente enregistré par le camion t dans la zone z

$TS_{t,z}$ Dénote le temps de service d'un camion t dans la zone z

$TT_{t,z}$ Dénote le temps de déplacement enregistré en heure par le camion t dans la zone z et exprimé selon l'Équation (7).

$$TT_{t,z} = D_{t,z}/s_t \quad (7)$$

En se référant à la courbe du modèle d'émission développé (Figure 31), on remarque que lorsque le camion est à l'arrêt ou se déplace à des vitesses faibles, les taux de GES sont très élevés (6293,5 g eqCO_2). Cela est principalement dû au fait que les moteurs ont besoin de fournir un effort considérable pour maintenir le fonctionnement du véhicule à des vitesses aussi faibles. Dès que la vitesse augmente, les émissions de GES commencent à diminuer pour atteindre un taux inférieur à 2000 g eqCO_2 entre 50 et 60 mi/h. Toutefois, elles commencent à augmenter de nouveau à des vitesses très élevées (70 mi/h). En effet les moteurs sont conçus pour être plus efficaces et utilisent moins de carburant à des vitesses modérées.

Pour confirmer la robustesse de notre modèle d'émission, nous avons comparé les résultats prédictifs du modèle avec ceux rapportés dans la littérature examinée dans des contextes similaires. Selon Roso, (2007), les émissions de CO_2 lors de l'attente des camions où à des vitesses très bas est de 6000 g/h. Quiros et al. (2017) ont rapporté, à une vitesse de 7,8 mph, dans un contexte urbain, une émission de 3055 g $\text{eq CO}_2/\text{mi}$ pour des camions diesel conventionnels de l'année 2007. Une étude menée par Barth & Boriboonsomsin (2008) a révélé une augmentation rapide et non linéaire des émissions polluantes et de la consommation de carburant, lorsque les vitesses de déplacement des véhicules descendent en dessous de 30 mph. Selon les mêmes auteurs, Lorsque la vitesse de déplacement chute de 30 mph à 12,5 mph ou de 12,5 mph à 5 mph, les émissions de CO_2 augmentent de manière significative, doublant par kilomètre parcouru. Les changements fréquents de vitesse associées aux arrêts et départs, augmentent les taux d'émission car la consommation de carburant dépend non seulement de la vitesse, mais aussi des taux d'accélération (Frey et al., 2008). La vitesse optimale de déplacement des camions qui limite les émissions par kilomètre est supposée être 44 mph ou 71 km/h (Figliozzi, 2011). Li et al. (2020) rapporte des taux de CO_2 proche de 1000 g/km pour une vitesse de 60 km/h (37,3 mph) pour des camion poids lourds type diesel à Pékin. Toutes ces résultats confirment que notre modèle d'émissions de GES fournit un bon résultat et est cohérent avec certains travaux de recherche.

Quant à la position épistémologique du modèle développé, il semble pencher davantage vers l'approche mésoscopique. Comme recensée dans la littérature, les méso modèles permet de modéliser l'empreinte carbone et ses impacts en combinant les avantages des approches macroscopique et microscopique. Cela pourrait être considéré comme une échelle intermédiaire entre une vue globale et une vue extrêmement détaillée. Comparés aux modèles microscopiques qui focalisent sur des comportements individuels et des entités spécifiques en temps réel, les méso-modèles sont moins exigeants en termes de ressources de calcul et se sont basés sur des données moyennes pour évaluer l'empreinte carbone, ce qui est le cas pour ce travail, puisque l'input du modèle développé est la vitesse moyenne pour une flotte de camions portuaires. En revanche, la précision des méso-modèles dépend de la qualité des données d'entrée.

2.4.4 Modèle de simulation

2.4.4.1 Conception du modèle de simulation

Le modèle d'émission global développé est implémenté dans un modèle de simulation qui est utilisé pour évaluer les émissions. L'objectif du modèle de simulation est de reproduire le comportement des camions à l'intérieur du port en utilisant des paramètres stochastiques dérivés de données empiriques pour estimer leur empreinte carbone. La simulation stochastique est utilisée dans le cadre de ce travail. Cette section aborde les processus principaux ayant servi à la modélisation du modèle de simulation.

Le logiciel Simio version 15 est utilisé pour développer le modèle de simulation. Ce modèle utilise une collection de processus et d'objets de la bibliothèque de Simio pour configurer les différents flux, les portes d'entrée/sortie et les zones (A, B, C et D). Les paramètres de simulation stochastique sont implémentés dans divers objets et processus. Le modèle mis en œuvre comprend deux sources de flux, chacune dédiée à un type de camion (camions de marchandises et camions de construction). Chaque camion est attribué à une zone de destination en fonction de la probabilité historique du flux et demeure dans cette zone en respectant un TS stochastique spécifique à cette zone. Dans chaque zone, des paramètres stochastiques pour la LUT, la vitesse et la distance sont attribués à chaque camion. La

normalisation des différentes unités a été effectuée en cas de besoin. À la fin du temps de service, le camion quitte le port et les émissions sont calculées en fonction des comportements opérationnels du camion. Ainsi, les objets qui constitue le modèle de simulation sont :

- Entités : les entités qui circulent dans le système sont les camions de fret et les camions de construction.
- Deux sources : une première source (CamFret) pour générer les camions de fret et une deuxième source pour produire les camions de construction (CamConstr) selon un processus d'arrivée aléatoire où les intervalles entre les arrivées suivent une distribution exponentielle.
- Deux serveurs pour l'entrée des camions : le premier est lié à l'entrée des camions par la guérite principale (AccGP) et le deuxième est lié à l'entrée des camions par la guérite secondaire (AccGS).
- Deux serveurs pour la sortie des camions : le premier est lié à la sortie des camions par la guérite principale (ExitGP) et le deuxième est lié à la sortie des camions par la guérite secondaire (ExitGS).
- Quatre serveurs des zones : chaque serveur représente une zone spécifique.
- Quatre points de transfert : le premier point (TN11) sert à transférer les camions à la guérite principale. Le deuxième point (TN12) assure le transfert des camions à la guérite secondaire. Le troisième point (TN1) sert à transférer les camions des guérites d'entrées vers les zones. Le quatrième point (TN2) déplace les camions des zones vers les guérites de sorties.
- Deux sorties : pour retirer les camions quittant le système portuaire (DepartGP et departGS).
- Inputs : pour chaque zone, les inputs sont utilisés avec la fonctionnalité « State Assignments on Entering » qui permet d'implémenter le modèle d'évaluation GES présenté dans la section 2.4.3. La collecte des statistiques dans chaque zone a été faite à l'aide de la fonctionnalité « Tally Statistics on Entering ».

Afin de permettre au système simulé d'atteindre un état stable après le démarrage de la simulation et pour garantir la fiabilité et la validité des résultats de la simulation, une période de réchauffement dans Simio est une phase nécessaire de la simulation où le système s'ajuste et se stabilise avant que les données significatives ne soient collectées. Pour notre cas, la simulation atteint un état stationnaire après un temps d'exécution de 30 jours.

Le modèle de simulation est configuré pour simuler une journée en prenant en compte le flux lié à cette période. Afin de garantir son fonctionnement conformément aux attentes, le modèle a été soumis à plusieurs tests de vérification. Au niveau de la collecte des données, les outputs de chaque réplication pour les scénarios sont enregistrés dans des fichiers Excel au cours de la simulation à l'aide de la fonction « ExcelWrite ». La Figure 32 montre la conception du modèle de simulation.

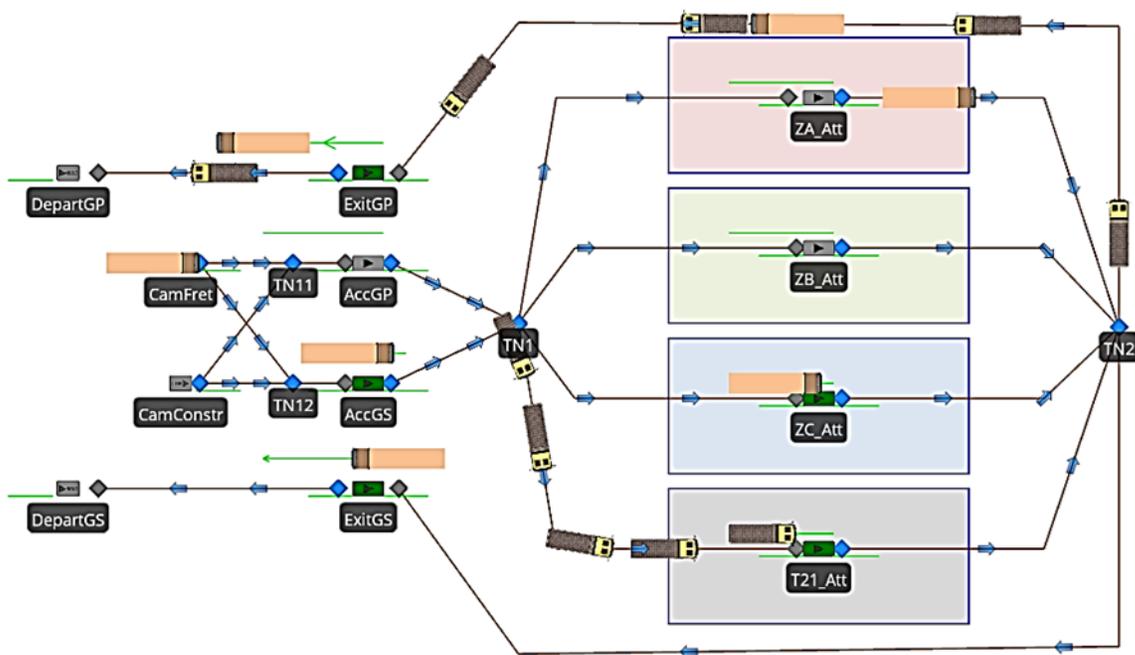


Figure 32: Conception du modèle de simulation

Le temps inter-arrivée des camions est ainsi défini comme une fonction de la période simulée divisée par le nombre de camions fréquentant le port sur la même période. Pour calculer le temps de trajet dans chaque zone, le modèle divise la distance par la vitesse. Il détermine également les autres temps d'attente en soustrayant la somme du temps de déplacement et des durées de chargement/déchargement du temps total passé dans le système. Les calculs d'émissions utilisent un modèle de régression (équation 1) qui fait la distinction entre l'état d'attente (en tenant compte des durées de chargement/déchargement et des autres temps d'attente) et l'état de déplacement. Pour l'état d'attente, le modèle de régression attribue des émissions équivalentes à une vitesse nulle, tandis que pour l'état de déplacement, il attribue des émissions correspondant à la vitesse de déplacement réelle. Donc, la valeur agrégée des émissions fusionne les émissions dues à l'attente des camions (y compris les temps de chargement/déchargement et les autres temps d'attente) et aux déplacements. Une fois leurs activités sont terminées, les camions quittent le port et leurs émissions sont ajoutées au décompte global des émissions. La Figure 33 illustre l'intégration du modèle d'émission dans le cadre de simulation, en fournissant une représentation visuelle de la manière dont les émissions sont calculées et attribuées tout au long du processus de simulation.

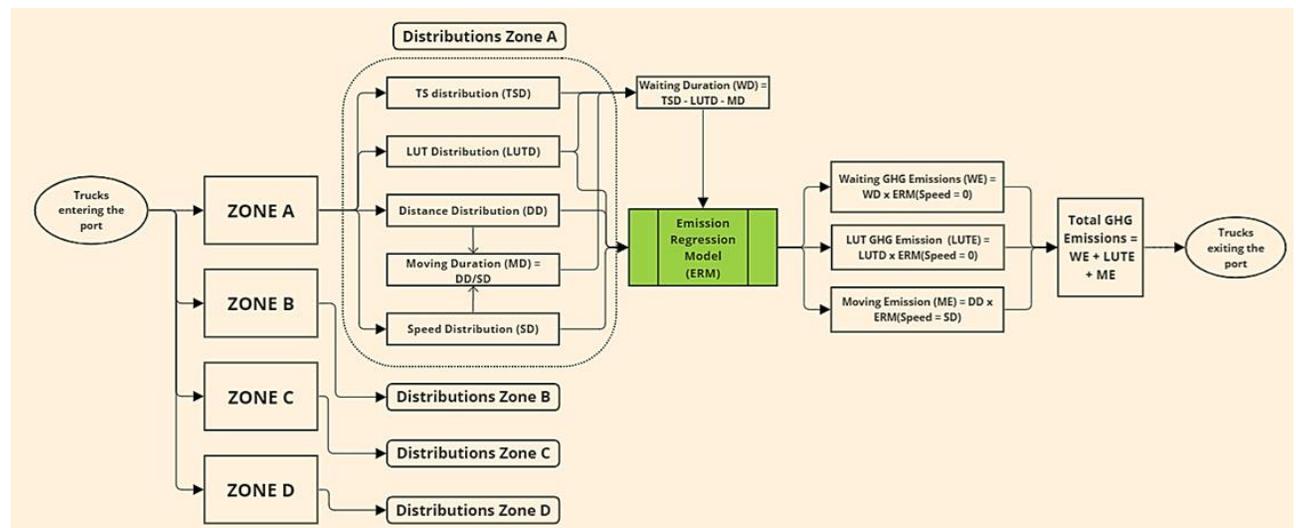


Figure 33: Cadre du processus de la simulation.

2.4.4.2 Conception des scénarios

Pour l'évaluation, différents scénarios ont été élaborés. Ces scénarios comprennent un scénario de base qui sert de point de référence et d'autres scénarios d'exploration destinés à évaluer expérimentalement les émissions dans divers contextes prospectifs. Ces contextes sont principalement centrés sur l'augmentation anticipée du trafic de camions visitant le port durant les travaux de construction. Sur la base des données fournies par l'autorité portuaire, la croissance du nombre de camions de marchandises est d'environ 9690 au cours de cette période, tandis que les camions de construction devraient atteindre une moyenne de 145 camions par jour au cours de la même période.

2.5 Résultats

Après avoir simulé notre modèle sur une période de 365 jours, nous avons validé tous ses paramètres stochastiques avec une incertitude de moins de 5%. Ceci autorise désormais son exploitation. Il est employé pour reproduire fidèlement une période de référence basée sur des données empiriques, ainsi que pour prédire les émissions de GES lors de la construction du nouveau terminal. Nous analyserons et interpréterons ces résultats afin de proposer des recommandations pertinentes pour d'éventuels programmes de réduction des émissions de GES.

2.5.1 Scénario de référence

Au cours de la simulation de l'activité de fret sur une durée d'un an, il a été observé que les émissions de GES provenant des camions varient en fonction des zones du port. Plus précisément, la nature des émissions dans chaque zone est déterminée par le comportement des camions, que ce soit pendant leur mouvement, les étapes de chargement/déchargement ou lorsqu'ils sont en phase d'attente. Le Tableau 10 résume les résultats obtenus pour une activité annuelle de 43 286 camions de fret dans les différentes zones du port. En somme, les émissions annuelles totales de GES s'élèvent à 453 tonnes, réparties comme suit : Zone A (36,2%), Zone B (36,1%) et Zone C (27,7%).

Tableau 10: Résultat annuel des émissions et du temps passé au port par zone.

Zone	Nombre du camions	Distance (Km)	Temps (h)				Émission de GES (kg éqCO ₂)				% Émission
			TS	Char/Déch	Déplacement	Attente	Char/Déch	Déplacement	Attente	Total	
A	13714	31151	18315	6286	1728	10301	39889	58778	65373	164040	36,2
B	15679	25186	19673	2823	1380	15470	17916	47249	98172	163336	36,1
C	13893	15114	16184	6918	810	8456	43901	28033	53662	125596	27,7
Total	43286	71451	54172	16027	3918	34227	101707	134059	217207	452973	100

La Figure 34 illustre davantage la répartition du temps annuel passé dans le système selon l'état des camions et les zones visitées.

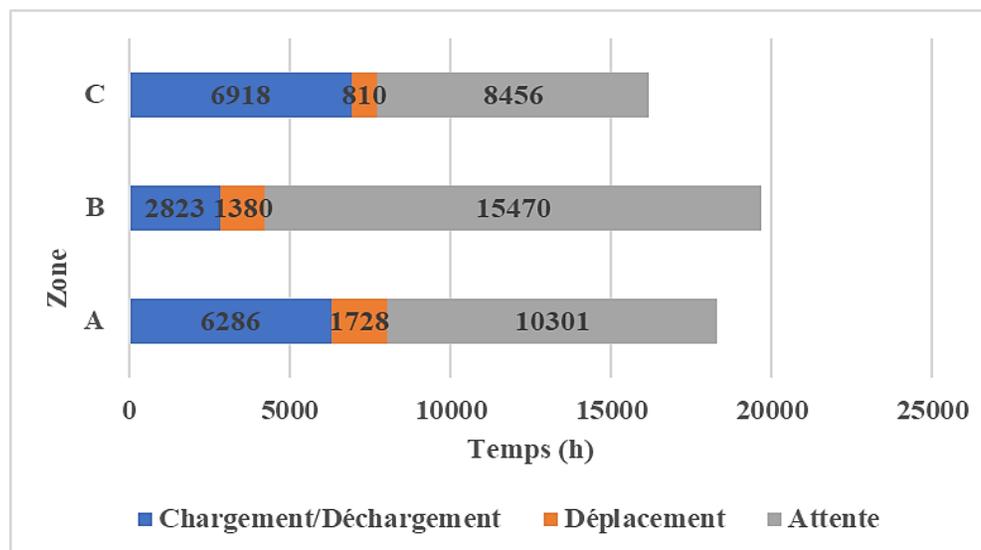


Figure 34: Répartition annuelle du temps en fonction de l'état des camions et des zones visitées.

Les résultats indiquent aussi que l'attente est le comportement le plus émetteur d'émission de GES pour toutes les zones, représentant 40 % (65373 kg éqCO₂), 60 % (98172 kg

éqCO₂) et 42 % (53662 kg éqCO₂) des émissions respectivement pour les zones A, B et C. La Figure 35 fournit des détails supplémentaires sur les émissions annuelles de GES en fonction d'état de camion et de zone visitée.

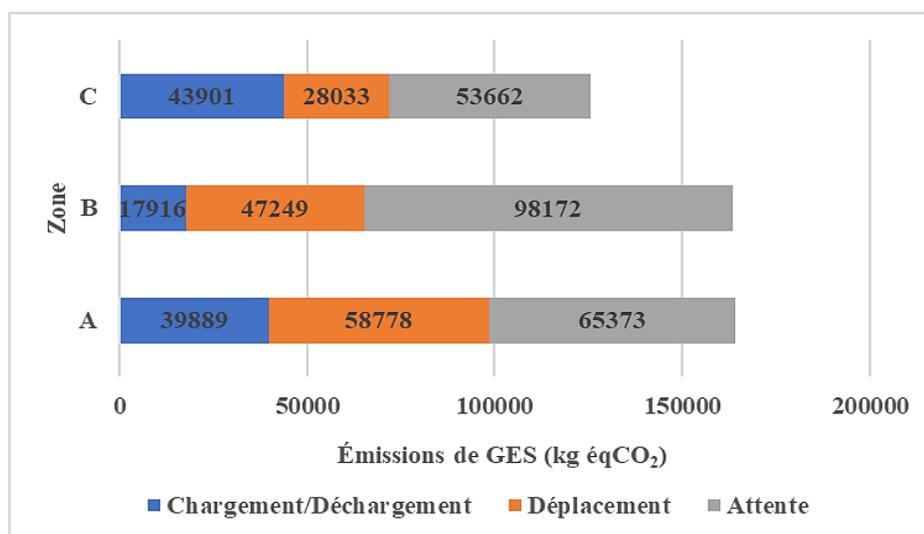


Figure 35: Émissions annuelles de GES par état de camion et par zone visitée.

D'après la Figure 36, qui illustre le temps moyen passé dans le système, la durée d'attente moyenne la plus longue est enregistrée dans la zone du grain (zone B) avec une moyenne de 59,2 min contre 36,5 min pour la zone C et 45,1 min pour la zone A. Le temps de chargement/déchargement moyen dans la zone B (10,8 min) est considérablement inférieur à celui de la zone A et C. Le temps de déplacement le plus court est observé dans la zone C avec une moyenne de 3,5 min.

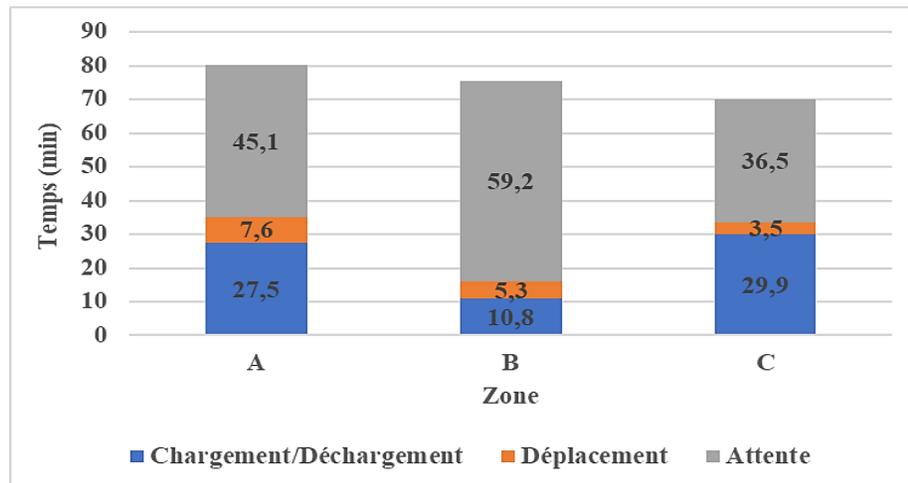


Figure 36:Durée moyenne passé dans le système par état de camion et par zone visitée.

En moyenne, un camion de la zone A émet 12 kg d'éqCO₂, répartis comme suit : déplacement (36 % : 4,3 kg d'éqCO₂), chargement/déchargement (24 % : 2,9 kg d'éqCO₂) et attente (40 % : 4,8 kg d'éqCO₂). Un camion de la zone B émet en moyenne 10 kg de CO₂éq contre 9 kg éqCO₂ émises dans la zone C. La Figure 37 offre une vision détaillée sur la répartition de GES selon les différents états de camion dans chaque zone.

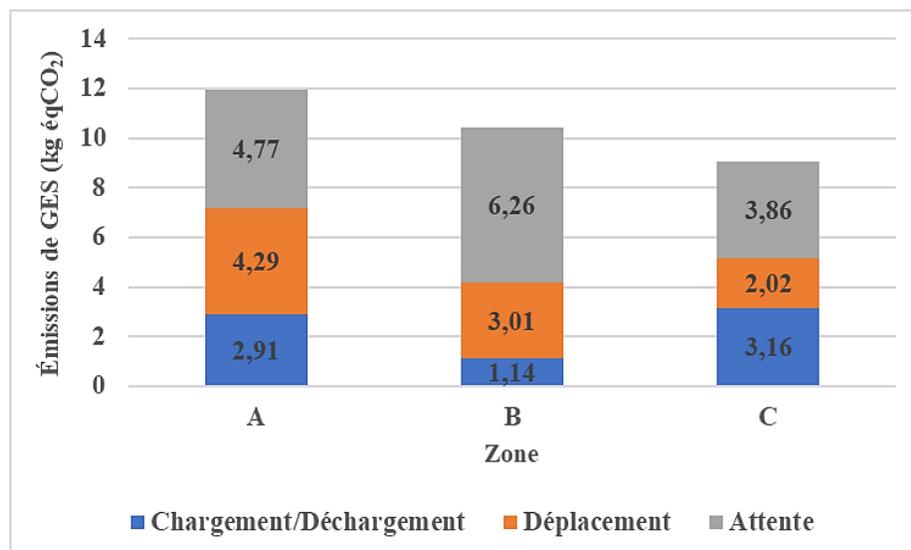


Figure 37:Moyenne des émissions de GES par état de camion et par zone visitée (en kg éqCO₂).

2.5.2 Prévision des émissions pour la période de construction

Les autorités portuaires prévoient une augmentation significative du nombre de camions visitant le port au cours de la période de construction du nouveau terminal. Par conséquent, les paramètres du modèle de simulation pour les flux et les temps d'inter-arrivée changeront. Au cours de cette période, les émissions globales de GES devraient doubler pour atteindre 3 tonnes par jour et seront réparties entre les zones A (18 %), B (22 %), C (11,6 %) et D (48,4 %). Le Tableau 11 illustre le nombre de camions, les distances parcourues, ainsi que les détails du temps et des émissions pour cette période.

Tableau 11: Résultats annuels du temps et des émissions de GES pour chaque zone.

Zone	Nombre de camions	Distance (km)	Temps (h)				Émission de GES (kg éqCO ₂)				% Émission
			TS	Char/Déch	Déplacement	Attente	Char/Déch	Déplacement	Attente	Total	
A	16138	37260	21548	7402	2080	12066	46970	70339	76568	193877	18
B	22722	36576	28539	4085	2021	22433	25924	68771	142361	237056	22
C	13857	15077	16147	6899	819	8429	43781	28093	53493	125367	11,6
D	53688	119246	53680	17913	6619	29148	113677	224724	184971	523372	48,5
Total	106405	208159	119914	36299	11539	72076	230352	391928	457394	1079674	100

Les émissions totales de GES au cours de la période de construction sont estimées à 1079 tonnes par an, ce qui représente une augmentation significative d'environ 138 % par rapport aux émissions annuelles selon le scénario de référence. L'augmentation des émissions est principalement due à l'augmentation du nombre de camions visitant le port dans les zones A (2440 camions par an) et B (7250 camions par an) et aux camions impliqués dans la construction du nouveau terminal (une moyenne de 145 camions par jour). Les Figures 38 et 39 présentent, respectivement, la répartition du temps annuels passé dans le système et

des émissions annuelles selon l'état du camion et la zone visitée. Ces aides visuelles illustrent l'impact significatif de l'augmentation du trafic de camions sur l'empreinte carbone au sein du système portuaire et fournissent une base pour l'évaluation des stratégies d'atténuation potentielles.

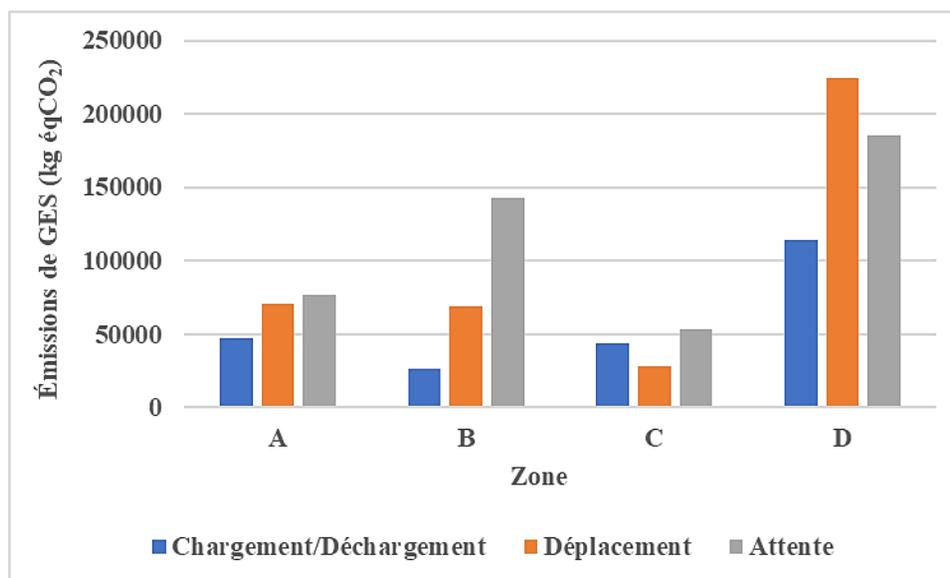


Figure 38: Émissions annuelles de GES par état de camion et zone visitée.

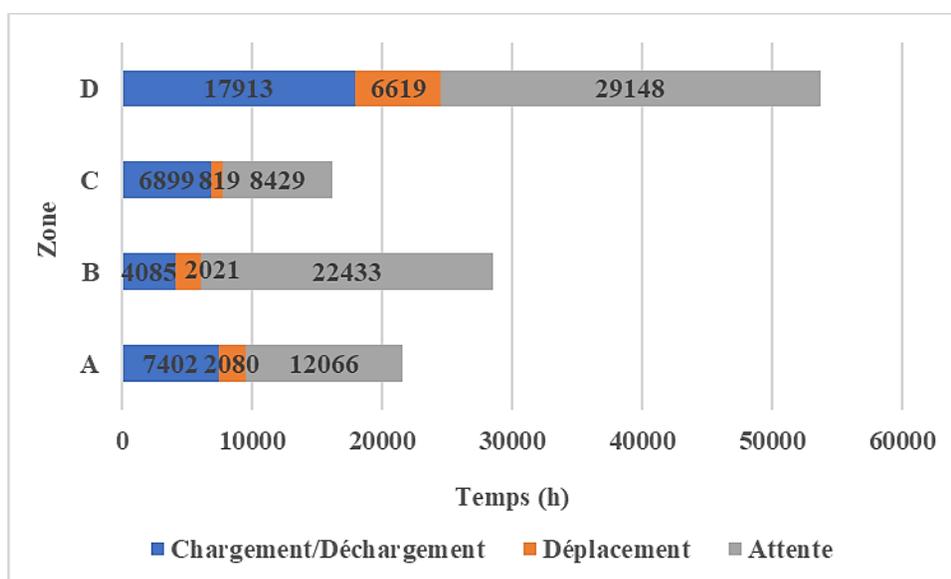


Figure 39: Temps annuel passé dans le système par état de camion et zone visitée.

En moyenne, un camion fréquentant la zone D émet 9,8 kg d'éqCO₂, répartis comme suit : déplacement (43 % : 4,19 kg d'éqCO₂), chargement/déchargement (22 % : 2,12 kg d'éqCO₂) et attente (35 % : 3,45 kg d'éqCO₂). La Figure 40 fournit plus de détails sur la répartition des émissions moyennes selon les différents états de camion dans chaque zone.

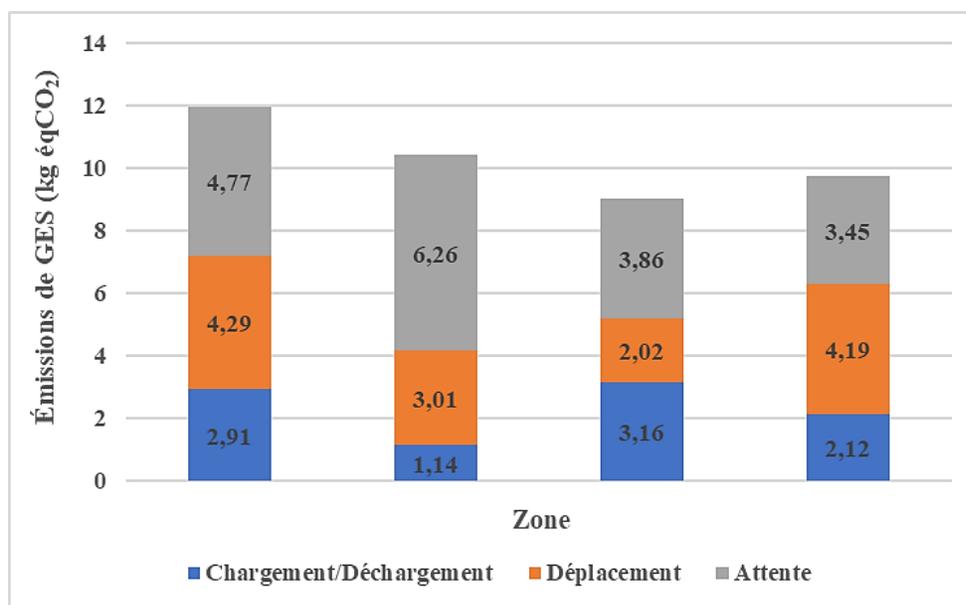


Figure 40: Répartition moyenne des émissions de GES par zone et par état des camions dans le système portuaire.

D'après la Figure 41, qui illustre la durée moyenne passée dans le système, un camion de la zone D passe en moyenne 20 min au chargement/déchargement, 7,4 min en moyenne au déplacement, et 32,6 min en moyenne à l'attente.

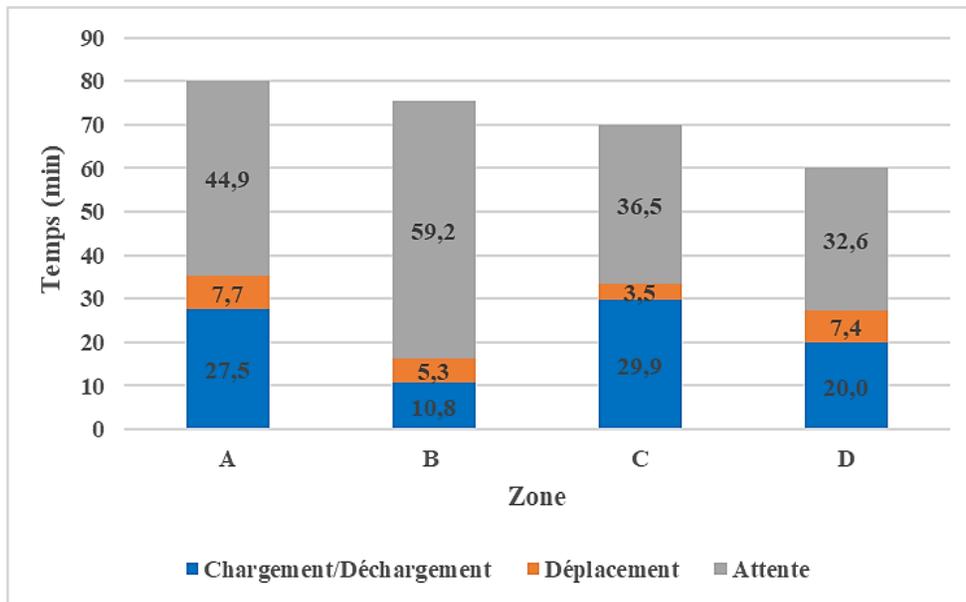


Figure 41:Durée moyenne passé dans le système par état de camion et par zone visitée.

La Figure 42 met en évidence l'augmentation annuelle des émissions de GES associée au scénario de prédiction (SC1) par rapport au scénario de référence (SC0), compte tenu du nombre supplémentaire de camions visitant les zones A, B et D.

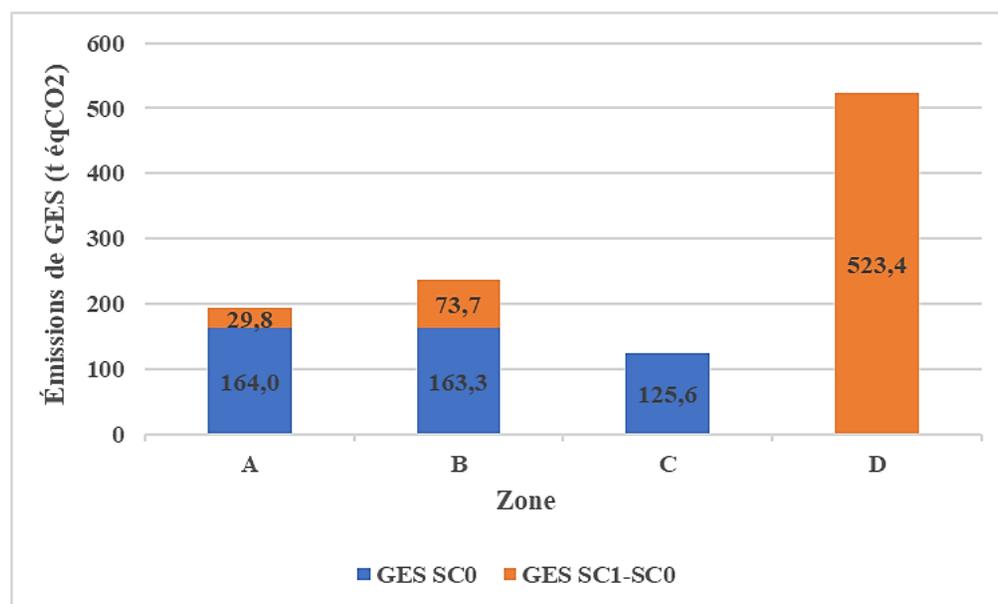


Figure 42:Accroissement annuel des émissions de GES.

2.6 Conclusion

Cet article présente un modèle sophistiqué axé sur la quantification des émissions de GES provenant du transport routier dans un environnement complexe d'interfaces portuaires non-conteneurisés. Les paramètres du modèle sont méticuleusement établis, en appliquant des méthodes statistiques descriptives et analytiques à des ensembles de données empiriques, ce qui témoigne d'un engagement en faveur de la précision et de la pertinence dans l'analyse environnementale. La simulation des comportements complexes des camions routiers dans les paramètres définis du port représente un défi substantiel, principalement en raison de la complexité du traitement des données. Au-delà de l'objectif fondamental d'évaluation des émissions, ce modèle joue un rôle central dans l'identification des mesures spécifiques qui nécessitent une intensification de la recherche et de l'intervention. Il vise à identifier des stratégies efficaces de réduction des GES dans des domaines ou opérations qui méritent une attention particulière, contribuant ainsi à des efforts de conservation de l'environnement plus vastes et plus efficaces.

Cependant, pour atteindre le plein potentiel et l'applicabilité de ce travail, les progrès futurs devraient se concentrer sur une échelle plus microscopique, en examinant les attributs individuels liés aux camions tels que l'âge, la consommation d'énergie, la charge, les comportements de conduite et la puissance du moteur. Chacun de ces éléments influence de manière significative les émissions produites, et leur prise en compte attentive est crucial pour le développement d'un modèle d'émissions plus complet et plus précis.

Il s'agit donc de concevoir un système d'information innovant capable de fournir des informations approfondies sur les comportements du camion et d'intégrer une structure avancée visant à améliorer la précision prédictive des analyses de la circulation. Une amélioration essentielle dans ce domaine serait d'assurer un accès sans entrave aux informations sur les entités du trafic, en éliminant les barrières administratives. De telles améliorations renforceront les paramètres de simulation sous-jacents et le modèle fondamental de GES, permettant le développement d'un modèle microscopique en temps réel qui peut offrir des prédictions plus précises.

3. ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET DISCUSSION

3.1 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est une méthode pour évaluer la robustesse d'un modèle de simulation. Dans cette étude, l'analyse se porte sur le temps de chargement/déchargement des camions pour étudier ses effets sur les émissions de GES au sein du port. Ce choix découle naturellement des circonstances particulières. En effet, malgré l'importance du temps de déplacement et du temps d'attente, ces deux paramètres sont largement indépendants de notre contrôle, rendant le temps de chargement/déchargement comme le principal levier d'action. D'une part, le temps de déplacement ne peut pas être modifié, car une fois à l'intérieur du port, un camion doit suivre un itinéraire prédéterminé selon sa destination dans le port donc nous ne sommes pas en mesure d'influencer la distance et la trajectoire à l'intérieur du port. D'autre part, le temps d'attente est un facteur incontrôlable en l'absence d'un système centralisé de rendez-vous et il est étroitement lié au temps de chargement/déchargement. À mesure que ce dernier augmente, le temps d'attente augmente automatiquement. Par conséquent, le temps de chargement/déchargement apparaît comme le paramètre le plus susceptible d'être optimisé actuellement. En plus, ce facteur est soumis à une grande variabilité liée au type et taille de marchandises transportées, l'infrastructure du port, les règlements et procédures de manutention en vigueur comme le démontre la recension suivante. Selon Roso (2007), le temps de chargement dans un port maritime est estimé à 12 min par camion. Rajamanickam & Ramadurai (2015) ont révélé que le temps de service du chargement/déchargement dans un terminal est d'environ une heure, ce qui est similaire à celui du port de Los Angeles - Long Beach (51 min), comme l'indiquent (Owen & Wargo, 2011). Au port de Tanjung Priok en Indonésie, le même temps est estimé à 39,18 min (Nurcahyo et al., 2020). Birnur et al. (2014) indiquent que le temps de chargement seul au Port de New York/New Jersey est de 20 min avec un maximum de 38 min alors que le temps de déchargement est estimé à 31 min avec un minimum de 6 min et un maximum de 48 min. Selon Chung et al. (2007), le temps de chargement et de

déchargement d'un conteneur est supposé être de 5 min. Murty et al. (2005) stipulent que le nombre de véhicules en attente dans une zone de chargement ne devrait pas dépasser 6 pour éviter la congestion et optimiser le flux. Cette diversité de données souligne l'importance d'une analyse de sensibilité spécifique à chaque contexte portuaire pour comprendre et améliorer la performance opérationnelle et environnementale. Identifier des moyens pour accélérer le processus de chargement et de déchargement peut être essentielle pour réduire les temps d'attente et par conséquent, minimiser les émissions de GES associées à l'activité des camions dans les zones portuaires.

Avant de procéder à l'analyse de sensibilité, il faut, en premier, déterminer la variation du temps de service des camions dans le système par rapport aux temps de chargement/déchargement. Cette variation relative est exprimée par l'équation (8) et (9).

$$\Delta TS = \Delta LUT + \Delta TT + \Delta OWT \quad (8)$$

$$\frac{\Delta TS}{\Delta LUT} = \frac{\Delta LUT}{\Delta LUT} + \frac{\Delta TT}{\Delta LUT} + \frac{\Delta OWT}{\Delta LUT} \quad (9)$$

Étant donné que le temps de déplacement est indépendant du temps de chargement/déchargement, on obtient l'équation (10).

$$\frac{\Delta TS}{\Delta LUT} = 1 + 0 + \frac{\Delta OWT}{\Delta LUT} \quad (10)$$

D'après cette équation, la variation de TS par rapport à LUT est égale à 1 plus le changement relatif de OWT par rapport à LUT. Afin de déterminer cette dernière relation, nous avons revisité la base de données concernant le temps de chargement et de déchargement en limitant les données à l'intervalle de 5 min à 60 min. Cette plage a été choisie en se référant aux études précédemment citées dans la littérature. La corrélation entre le temps d'attente autre qu'un chargement/déchargement (OWT) et le temps de chargement/déchargement (LUT) est mise en évidence par la courbe de régression linéaire visible dans la Figure 43.

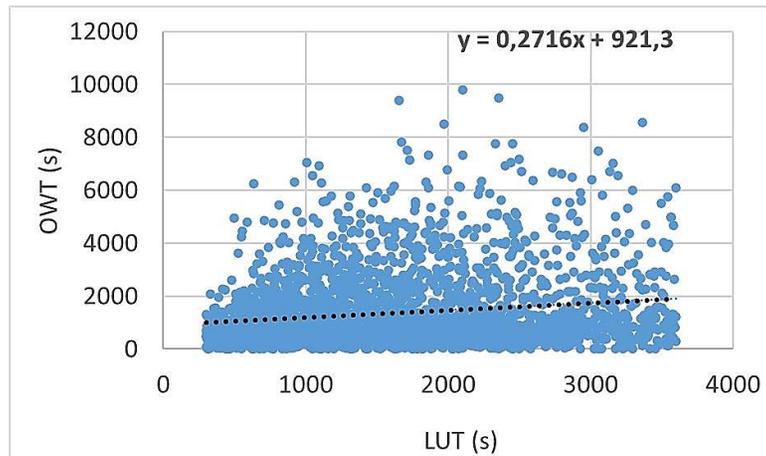


Figure 43: Variation du temps d'attente par rapport au temps de chargement/déchargement.

Ainsi, on peut conclure que :

$$\frac{\Delta OWT}{\Delta LUT} = 0,2716 \quad (12)$$

Ce qui implique que :

$$\frac{\Delta TS}{\Delta LUT} = 1,2716 \quad (13)$$

Cette relation a été implémenté dans Simio comme suit,

$$TS_{t,z} + 1,2716 * (LUT_{t,z} - \frac{\sum_z LUT}{n}) \quad (14)$$

Étant qu'on opte pour des variations déterministes du paramètre LUT, la variation de ce paramètre est égale à la différence entre la nouvelle valeur et la moyenne des LUT. Cette moyenne découle de la distribution ou des observations qui ont servi pour produire cette distribution, ou $\frac{\sum_z LUT}{n}$ dénote la moyenne du temps de chargement/déchargement relatif à chaque zone.

3.1.1 Conception des scénarios

La première phase de notre analyse de sensibilité implique la conception de scénarios spécifiques à évaluer. Nous avons élaboré 8 scénarios distincts pour mesurer l'impact des variations du temps de chargement/déchargement sur les émissions de GES totales et par zone. Le premier scénario, utilisé comme point de référence, conserve les distributions initiales du temps de chargement/déchargement pour toutes les quatre zones. Le deuxième scénario se base sur les moyennes de ces temps par zone, visant à examiner la stabilité du paramètre stochastique concerné. Pour les scénarios 3 et 4, nous avons augmenté la moyenne de temps de chaque zone de 0,05 heure, une décision influencée par des facteurs externes susceptibles d'allonger ces temps, comme les conditions météorologiques adverses, les pannes d'équipement ou les grèves. À l'inverse, dans les scénarios 5 à 8, nous avons envisagé une réduction du temps de chargement/déchargement de la même ampleur, reflétant les améliorations potentielles dues aux avancées technologiques ou aux améliorations dans la gestion opérationnelle. Pour la zone B, nous avons fixé un seuil minimal de 6 minutes (soit 0,1 heure), basé sur une estimation expérimentale antérieure, car ce temps ne peut pas descendre en dessous de cette limite. Les détails et spécifications de ces scénarios sont résumés dans le Tableau 12.

Tableau 12: Scénarios de l'analyse de sensibilité.

	LUT zone A	LUT zone B	LUT zone C	LUT zone D	Variation du LUT
Scénario 1 (Distributions)	Gamma (1019, 0.00045)	Triangulaire (0.1, 0.16, 0.27)	Gamma (711, 0.0007)	Triangulaire (0.25, 0.33, 0.41)	
Scénario 2	0,47	0,17	0,49	0,33	0
Scénario 3	0,52	0,22	0,54	0,38	+0,05
Scénario 4	0,57	0,27	0,59	0,43	+0,10
Scénario 5	0,42	0,12	0,44	0,28	-0,05
Scénario 6	0,37	0,1	0,39	0,23	-0,10
Scénario 7	0,32	0,1	0,34	0,18	-0,15
Scénario 8	0,27	0,1	0,29	0,12	-0,20

3.1.2 Présentation des résultats et interprétations

Pour l'obtention de résultats non biaisés, nous avons configuré 20 répliques avec une période de réchauffement de 30 jours, visant un intervalle de confiance de 95% pour nos résultats. Les données issues d'une simulation sur une période d'un an (365 jours) sont détaillées dans le Tableau 13. Le scénario 2 est utilisé à la fois comme point de référence et pour vérifier que les paramètres stochastiques des différentes zones tendent vers leur moyenne, ce qui est essentiel pour la validation des analyses futures. La précision des paramètres et des résultats relatifs aux émissions est confirmée par des erreurs ne dépassant pas 1% en valeur absolue, attestant ainsi de la fiabilité du modèle pour les expérimentations envisagées. Ainsi, les résultats montrent que les variations du LUT sont directement proportionnelles aux émissions de GES : une

augmentation du LUT entraîne une augmentation des émissions de GES, tandis qu'une diminution de ce paramètre entraîne une diminution de ces émissions.

Tableau 13: Résultat de l'analyse de sensibilité par scénario.

	Zone A				Zone B				Zone C				Zone D				Total	
	LUT	% variation	GES (kg éqCO ₂)	% variation	LUT	% variation	GES (kg éqCO ₂)	% variation	LUT	% variation	GES (kg éqCO ₂)	% variation	LUT	% variation	GES (kg éqCO ₂)	% variation	GES (kg éqCO ₂)	% variation
Scénario 1	Gamma	Référence	164023	Référence	Triangulaire	Référence	163934	Référence	Gamma	Référence	125340	Référence	Triangulaire	Référence	520724	Référence	974021	Référence
Scénario 2	0,47	2%	165683	1,00%	0,17	-0,80%	162471	-0,90%	0,49	-0,80%	124287	-0,80%	0,33	0	520191	-0,10%	972632	-0,10%
Scénario 3	0,52	11%	171256	3,40%	0,22	29%	168707	3,80%	0,54	10%	129872	4,50%	0,38	15%	541730	4,10%	1011570	4,00%
Scénario 4	0,57	21%	176830	6,70%	0,27	59%	174943	7,70%	0,59	20%	135458	9,00%	0,43	30%	563269	8,30%	1050500	8,00%
Scénario 5	0,42	-11%	160110	-3,40%	0,12	-29%	156236	-3,80%	0,44	-10%	118701	-4,50%	0,28	-15%	498653	-4,10%	933700	-4,00%
Scénario 6	0,37	-21%	154536	-6,70%	0,1	-41%	153742	-5,40%	0,39	-20%	113116	-9,00%	0,23	-30%	477116	-8,30%	898510	-7,60%
Scénario 7	0,32	-32%	148964	-10,10%					0,34	-31%	107531	-13,50%	0,18	-45%	455580	-12,40%	865816	-11,00%
Scénario 8	0,27	-43%	143391	-13,50%					0,29	-41%	101945	-18,00%	0,12	-64%	429740	-17,40%	828818	-14,80%

Les sous-sections suivantes présentent une interprétation des résultats, présentés dans le Tableau 14, pour chaque zone.

- Zone A

Concernant la zone A, les scénarios 3 et 4 (SC3 et SC4) montrent une augmentation du LUT de 11% et 21%, respectivement. Cette augmentation entraîne une hausse correspondante des émissions de GES de 3.4% et 6.7%. Cela suggère qu'une augmentation du temps de chargement/déchargement est associée à une hausse des émissions de GES. À l'opposé, les scénarios 5 à 8 (SC5 à SC8) présentent une réduction progressive du LUT, allant de -11% à -43%. Ces réductions sont accompagnées par une baisse des émissions de GES, allant de -3.4% à -13.5%. Cela indique qu'une diminution du temps de chargement/déchargement réduit potentiellement les émissions de GES. Le scénario 8 (SC8) montre une diminution significative de 43% dans le LUT, ce qui correspond à la plus grande baisse des GES, atteignant -13.5%. Cette corrélation indique que des améliorations marquées dans les processus de LUT peuvent avoir un impact considérable sur la réduction des émissions. En outre, il est à noter que pour atteindre une réduction des émissions de 13.5%, il est nécessaire de réduire le LUT de 43%. La Figure 44 met en lumière de manière graphique toutes ces constatations.

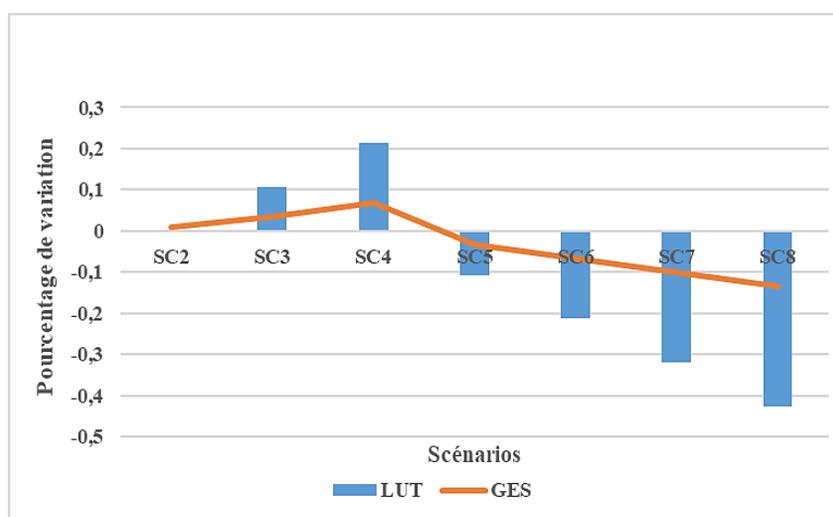


Figure 44: Tendence de variation des émissions de GES en fonction des variations de LUT pour la zone A.

- Zone B

Pour la zone B, les scénarios 3 et 4 (SC3 et SC4) démontrent une augmentation du LUT de 29% et 59%, respectivement. Cette hausse se traduit par une augmentation proportionnelle des émissions de GES de 3.8% et 7.7%. En revanche, les scénarios 5 à 8 (SC5 à SC8) affichent une réduction du LUT, variant de -29% à -41%. Ces diminutions s'accompagnent d'une baisse des émissions de GES, variant entre -3.8% et -5.4%. Notons que les scénarios 6, 7 et 8 se révèlent identiques. Cela s'explique par le fait qu'un seuil minimal de LUT a été préalablement établi à partir du 6ème scénario, pour cette zone, comme expliqué précédemment. La Figure 45 illustre toutes les informations.

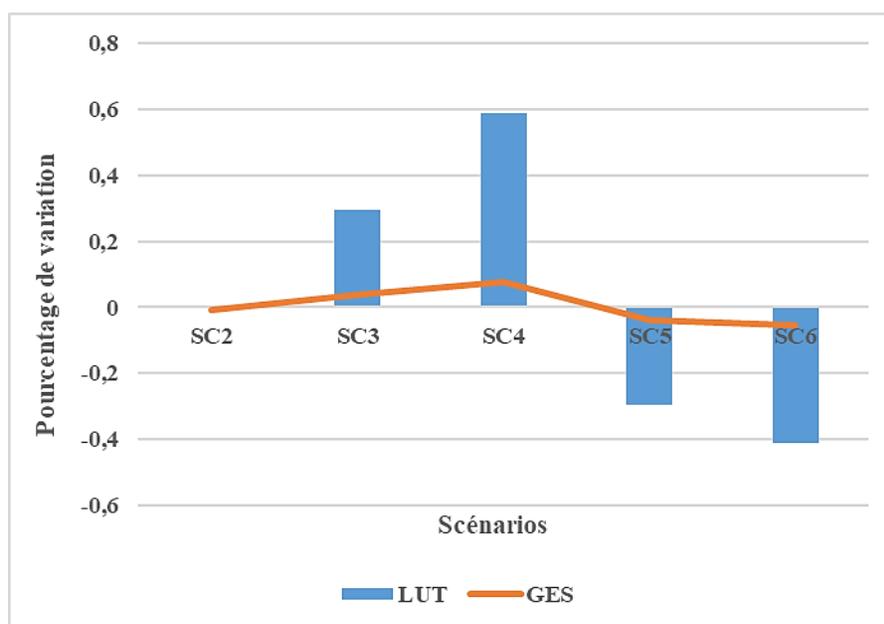


Figure 45: Tendance de variation des émissions de GES en fonction des variations de LUT pour la zone B.

- Zone C

Concernant la zone C, une élévation du LUT de 10% et 20%, respectivement pour les scénarios 3 et 4 (SC3 et SC4), se traduit par une augmentation des émissions de GES de 4.5% et 9%. Au contraire, la réduction du LUT observée dans les scénarios 5 à 8 (SC5 à

SC8), variant de -10% à -41%, induit une diminution des émissions de GES, allant de -4.5% à -18%. Notamment, le scénario 8 (SC8) qui correspond à la plus importante réduction des émissions de GES, soit -18%. La Figure 46 offre une représentation visuelle concise des résultats obtenus.

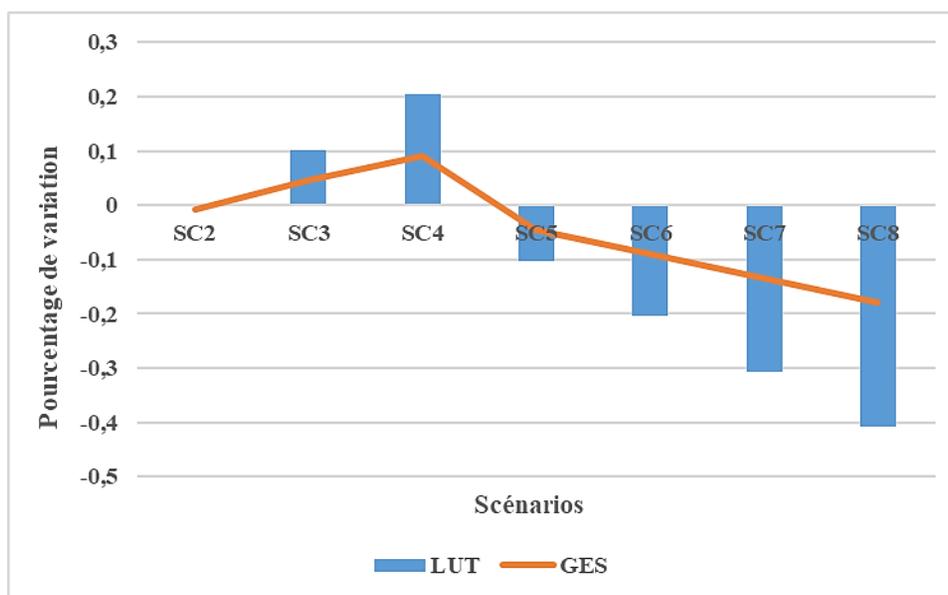


Figure 46: Tendence de variation des émissions de GES en fonction des variations de LUT pour la zone C.

- Zone D

En ce qui concerne la zone D, lorsque le LUT augmente de 15% et 30%, respectivement dans les scénarios 3 et 4 (SC3 et SC4), les émissions de GES augmentent de 4.1% et 8.3%. À l'opposé, lorsque le LUT diminue de -15% à -64% dans les scénarios 5 à 8 (SC5 à SC8). Les émissions de GES diminuent de -4.1% à -17.4%. Le scénario 8 (SC8) présente une réduction notable de 64% dans le LUT, représentant ainsi la plus importante baisse des émissions de GES, avec une diminution atteignant -17.4%. Plus de détails sont fournies dans la Figure 47.

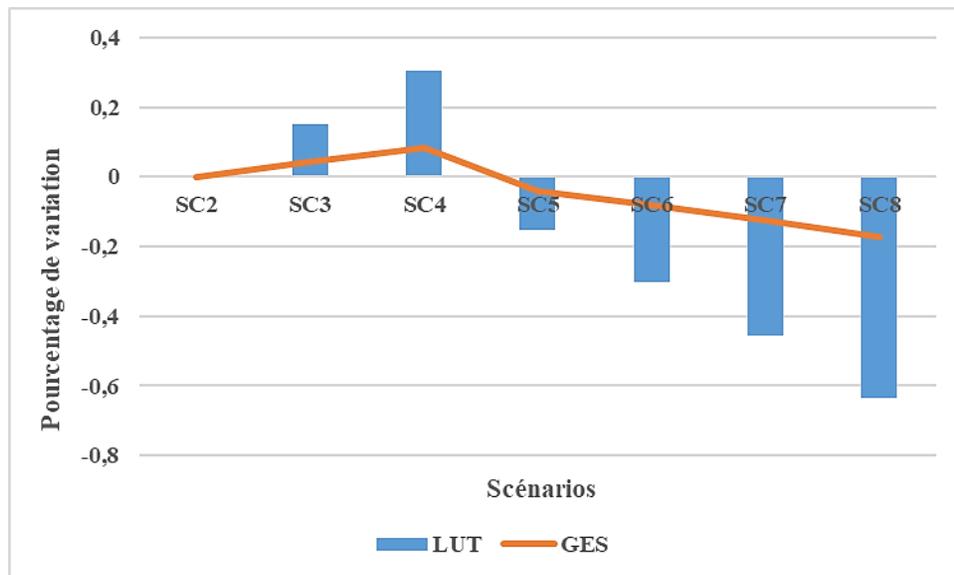


Figure 47: Tendence de variation des émissions de GES en fonction des variations de LUT pour la zone D.

En guise de conclusion pour cette section, il est à noter que l'analyse de sensibilité est cruciale pour confirmer la robustesse du modèle de simulation et pour évaluer le degré d'influence de chaque paramètre sur les résultats. Dans notre étude, le temps de chargement/déchargement a été sélectionné pour cette analyse en raison de son éligibilité à la variation. Nous avons établi un scénario de référence pour valider les données stochastiques, lesquelles devraient converger vers la moyenne du paramètre choisi. Ce scénario permet également de servir de référence au calcul des variations des différents scénarios testés. Les résultats indiquent que les changements dans le temps de chargement/déchargement affectent directement les émissions de GES dans toutes les zones, bien que l'impact varie en fonction de l'importance du paramètre concerné dans le temps de service des camions dans le système. Par exemple, la réduction de ce temps dans la zone C est très significative pour la diminution des émissions de GES, tandis que dans la zone B, son effet est moindre. Ces constatations peuvent constituer une contribution judicieuse, s'inscrivant en complémentarité avec les diverses ressources, opinions et expertises dont disposent les décideurs pour élaborer et mettre en œuvre des stratégies efficaces visant à réduire l'empreinte carbone.

3.2 Discussion

3.2.1 Discussion des résultats

Les résultats dérivés du modèle de simulation soulignent la répartition des émissions de GES entre les différentes zones et états de circulation des camions, ce qui donne des indications claires sur la façon d'atteindre les objectifs de réduction de l'empreinte carbone. Les résultats révèlent qu'une part substantielle des émissions de GES provient des temps d'attente dans le port, ce qui en fait le principal contributeur. Par conséquent, les efforts prioritaires devraient se concentrer sur la minimisation de ce facteur. Chen et al. (2013) affirment que la réduction des émissions dans les ports passe par la diminution des temps d'attente, qui peut être obtenue en optimisant la coordination de l'arrivée des camions et en modernisant les équipements portuaires. Do et al. (2014) suggèrent que les émissions dues aux temps d'attente des camions peuvent être considérablement réduites en limitant les temps d'entrée de chaque camion. L'une des stratégies les plus efficaces pour optimiser la programmation de l'arrivée des camions est l'adoption d'un système de rendez-vous des camions (TAS). Le TAS normalise les taux d'arrivée des camions, ce qui réduit considérablement les temps d'attente et, par conséquent, les émissions de CO₂ des véhicules lourds dans les terminaux portuaires (Ramirez-Nafarrate et al., 2017) (Chen & Yang, 2010). Morais & Lord (2006) ont réalisé une étude pour le gouvernement canadien, confirmant la réussite de la mise en œuvre du TAS au port de Vancouver et proposant des recommandations pour son adoption efficace ailleurs.

Dans la zone C, l'examen minutieux et la réduction des durées de chargement et de déchargement pourraient entraîner une réévaluation des niveaux de service et une réduction des émissions de GES. Nielsen et al. (2015) ont découvert que dans le port de Singapour, des services de chargement/déchargement appropriés peuvent réduire considérablement les émissions des camions. Ils ont constaté que les émissions diminuent d'environ 4 % lorsque le temps alloué au chargement et au déchargement est limité à 8 ou 12 heures au lieu de 24.

Pour la zone A, où les émissions sont principalement dues au trafic, il est recommandé d'étudier la faisabilité d'une nouvelle porte permettant un accès direct aux zones de

chargement/déchargement, ce qui pourrait atténuer la congestion entre les zones A et C.

D'autres stratégies efficaces pour réduire la consommation de carburant et les émissions de GES consistent à remplacer les camions-remorques utilisés pour les trajets intra-portuaires par des véhicules commerciaux à faibles émissions, à promouvoir l'adoption de systèmes Start-Stop pour couper les moteurs à l'arrêt, à préconiser l'utilisation de biocarburants ou d'alternatives à faibles émissions, à électrifier le transport de marchandises, voire à déployer des camions autonomes. Dans ce contexte, (Massar et al., 2021) ont analysé les facteurs propices à la réduction des émissions de GES grâce à l'automatisation des véhicules.

3.2.2 Comparaison avec d'autres travaux

Le Tableau 14 présente une comparaison entre les GES du port de Trois-Rivières et celles d'autres ports canadiens et internationaux pour différentes années. Ces ports présentent une diversité tant au niveau de leurs tailles que des contextes spécifiques liés aux marchandises qui y transitent. Ainsi, il serait judicieux dans des futures recherches d'adopter une unité relative, telle que l'EVP (équivalent vingt pieds) pour le contexte de la conteneurisation, qui permettrait d'établir une base de comparaison uniforme et une évaluation plus approfondie entre les ports.

Tableau 14: Comparaison des émissions de GES annuelles pour des différents ports.

Terminal maritime	Émissions de GES (t éqCO ₂)	Année-Source
Port de Trois-Rivières	453	2023
Port de Trois-Rivières	1079	Période de construction du nouveau terminal
Port de Montréal	4685	2017 (Port de Montréal, 2017)
Port de Vancouver	200000	2020 (Port de Vancouver, 2015)
Port of Los Angeles	519,996	2020 (Starcast Consulting Group LLC, 2021)
Port de Busan, Corée de sud	173009	2007 (Chin & Cheong, 2011)
Port de Chennai, Inde	6343	2017 (Misra et al., 2017)
Port de Guangzhou, Chine	751	2022 (Jiang et al., 2023)

L'analyse des taux de GES suggère que différents ports, qu'ils soient canadiens ou internationaux, font face à des vrais défis en matière de gestion des émissions de GES. Les écarts des émissions observées peuvent être liés aux volumes de trafic, types de marchandises traitées, aux infrastructures portuaires, équipement et technologies utilisés, aux politiques gouvernementales et aux efforts de durabilité mis en œuvre. Les ports qui ont réussi à réduire leurs émissions pourraient servir d'exemples inspirants pour des stratégies similaires au port de Trois-Rivières, afin de minimiser son impact environnemental. Cela nous mène à discuter les initiatives de réduction de GES possibles

dans la prochaine sous-section.

3.2.3 Solutions proposées pour la réduction des émissions de GES

Afin d'aborder la problématique des émissions de GES au port de Trois-Rivières, plusieurs mesures ciblées ont été proposées pour optimiser le trafic routier, améliorer les infrastructures et promouvoir des pratiques écologiques. Ces pistes de solutions demeurent de nature agnostique par rapport au contexte portuaire. En d'autres termes, elles peuvent être mises en œuvre avec succès dans divers environnements portuaires, même si elles sont initialement décrites dans le cadre spécifique du port étudié. Les solutions suggérées pour une gestion durable et responsable du transport routier au sein du port sont exposées dans le Tableau 15.

Tableau 15: Solutions de réduction des émissions de GES.

Pistes de solutions	Actions
Optimisation du trafic	<ul style="list-style-type: none"> -Ajuster l'itinéraire pour la zone A -Créer une nouvelle guérite pour un accès direct aux zones de chargement/ déchargement -Mettre en place un traceur GPS pour optimiser les itinéraires des camions et limiter les distances parcourues et les arrêts -Documenter les caractéristiques de consommation (âge, régime de moteur...) des flottes de camions du port pour identifier les moins performants -Optimiser le chargement des camions et employer le transport double, lorsque réalisable, pour éviter les retours à vide des camions -Mettre en place un programme de formation obligatoire et renouvelable pour les camionneurs afin de les sensibiliser aux problématiques d'accès et de circulation, tout en les amenant à éviter la marche au ralenti des moteurs et à faire les bons choix lorsqu'ils sont sur le site.
Optimisation d'accès	<ul style="list-style-type: none"> -Mise en place d'un système de rendez-vous -Prolonger les heures d'opération des guérites afin de déplacer les camions des heures de pointe aux heures creuses -Optimiser la répartition des charges entre la guérite principale et la guérite secondaire afin de mieux orienter le trafic vers les zones d'intérêt
Réduction des émissions à la source	<ul style="list-style-type: none"> -Encourager l'utilisation de biocarburant ou de carburants à faible émission -Électrifier les camions -Substituer les camions-remorques utilisés lors des déplacements intraportuaires par des véhicules utilitaires à faibles émissions -Encourager l'utilisation de système Start-Stop qui permet de couper le moteur à l'arrêt -Exiger l'utilisation de camions en bon état et qui doivent répondre aux cibles et exigences environnementales
Promotion de la durabilité	<ul style="list-style-type: none"> -Poursuivre la réalisation de bilan des émissions routiers et l'inventaire GES du port

Il est important de noter que la réduction des émissions de GES est un vrai défi en raison de la complexité inhérente des opérations portuaires, de la nature de l'infrastructure et l'environnement portuaire et des caractéristiques des camions eux-mêmes. Par exemple, la mise en place d'un système de rendez-vous aux terminaux portuaires est une procédure utile autant que risquée. L'absence d'une implication rigoureuse de la part de tous les acteurs augmente la congestion et les émissions, au lieu de les réduire. En plus, la transition vers des technologies plus propres, comme les camions électriques ou les carburants à faible émissions nécessite souvent des coûts élevés. L'adoption de nouvelles pratiques peut rencontrer une résistance au changement de la part des acteurs habitués à des systèmes plus anciens. Pour surmonter ces défis, une approche globale est nécessaire. Elle doit inclure un engagement fort de la hiérarchie, une communication efficace et bidirectionnelle, une collaboration continue entre les parties prenantes, une planification minutieuse et une adhésion de l'ensemble des acteurs. Le gouvernement peut également jouer un rôle crucial en mettant en place des réglementations adéquates, des incitations économiques et en favorisant l'adoption de technologies vertes. Une synergie entre ces différents éléments peut accélérer une transition énergétique durable et efficace au sein des opérations portuaires.

3.2.4 Limites et perspectives

Le modèle d'évaluation des émissions de GES développé offre une analyse construite sur des fondements empiriques et une rigueur scientifique. En classant les résultats selon les zones et le statut des camions à l'intérieur du port, il devient possible de discerner les facteurs critiques pour élaborer une stratégie efficace de réduction des émissions de GES. Toutefois, plusieurs limites existent et des perspectives se dessinent pour perfectionner ce modèle.

3.2.4.1 Limites

Comme c'est le cas pour toute recherche scientifique, cette étude comporte un ensemble de limites, lesquelles sont énumérées ci-après :

- Vitesse des camions : Bien que le modèle considère une vitesse stochastique pour tous les camions, une mise en œuvre plus détaillée de la vitesse à l'intérieur du port peut être réalisée en divisant les itinéraires en une série d'arcs, réduisant ainsi les incertitudes liées à l'utilisation d'une seule distribution de vitesse pour l'ensemble d'une zone. Par conséquent, le modèle de simulation peut attribuer plusieurs vitesses à chaque camion en fonction de sa position le long de l'itinéraire et de la zone de destination. Cela pourrait affiner les estimations d'émissions.
- Micro-attentes : Les données disponibles ne permettent pas d'analyser les situations de stop-and-go. Le modèle pourrait mieux simuler ces moments critiques en identifiant précisément les zones de ralentissement.
- Caractéristiques des camions : La robustesse du modèle pourrait être renforcée en incluant d'autres caractéristiques des camions, telles que l'âge, le type de moteur, le poids, etc.
- Niveau de service : Une des limites de l'étude est de considérer que le niveau de service est constant, indépendamment du nombre de camions. Ceci n'est pas réaliste et mérite une révision. En effet, le niveau de service dans un port se réfère à la qualité et à l'efficacité globale de l'exécution des opérations portuaires pour assurer un transport rapide des marchandises. Ce niveau peut être influencé par divers facteurs, notamment le nombre de camions dans le système.

3.2.4.2 Perspectives

Les perspectives de cette étude sont les suivantes :

- Corrélation camion-niveau de service : Les futures études devraient explorer la relation entre le flux de camions et le niveau de service. Cela aiderait à ajuster le modèle pour refléter plus précisément la réalité.
- Étude des solutions proposées : Il serait bénéfique d'évaluer les impacts réels des solutions suggérées, comme la planification des arrivées des camions, afin d'offrir des recommandations concrètes pour la réduction des émissions de GES.
- Analyse de sensibilité plus approfondie : Il est extrêmement utile de mener une

analyse de sensibilité détaillée sur d'autres paramètres comme le temps d'attente et les temps de déplacement. Une analyse exhaustive offre une compréhension claire des effets sur les tendances d'émission, permettant ainsi de mettre en évidence les paramètres les plus impactant. En adoptant cette méthode, on peut affiner les stratégies de réduction des émissions de GES en identifiant les éléments les plus déterminants du système analysé.

- Congestion urbaine : Intégrer la simulation de la congestion au centre-ville de Trois-Rivières est crucial pour comprendre les interactions entre les émissions du port et celles du milieu urbain.

En somme, alors que le modèle actuel fournit une base solide pour l'évaluation des émissions de GES, des améliorations et ajustements sont nécessaires pour le rendre encore plus précis et adapté à la complexité des opérations portuaires.

4. CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail dévoile un modèle d'évaluation et de prédiction de l'empreinte carbone du transport routier dans le contexte d'un port non-conteneurisé. Les paramètres constitutifs de ce modèle sont issus d'analyses statistiques approfondies appliquées à des données empiriques. Ces dernières, provenant de diverses sources, ont subi plusieurs étapes de nettoyage et de traitement pour assurer leur cohérence et pertinence pour le modèle de simulation. En effet, la conception d'un modèle fidèle aux contextes réels, simulant avec précision le comportement des camions à l'intérieur du port, a été un défi majeur.

L'aspect innovant du modèle conçu réside dans sa capacité à calculer les émissions de GES associées non seulement aux mouvements des véhicules et aux opérations de chargement/déchargement, mais également aux périodes d'immobilisation des camions tout au long de leur passage dans l'enceinte portuaire. Étant donnée la rareté de la littérature existante sur les émissions associées aux attentes des camions dans les terminaux maritimes, ce travail offre une valeur ajoutée non négligeable à cet effet. Au-delà de l'évaluation des émissions, l'objectif de ce modèle est de permettre l'exploration de zones ou d'activités opérationnelles qui pourraient faire l'objet d'une plus grande attention dans le cadre de programmes d'atténuation des émissions de GES.

Les analyses réalisées par notre modèle d'évaluation révèlent une variation significative des émissions de GES en fonction des zones de destination des camions au sein du port. Plus précisément, les émissions moyennes s'établissent à 12 kg pour les camions transitant par la zone A, à 10 kg pour ceux qui parcourent la zone B, et à 9 kg pour la zone C. Ces chiffres soulignent une différenciation notable des impacts environnementaux en fonction des zones spécifiques du port. Ces émissions cumulent une totalité annuelle de 453 tonnes. Pour la période de construction, une nette augmentation des émissions est prévue, avec une projection atteignant 1080 tonnes, soit une croissance de 138%. Cette hausse s'explique en grande partie par les camions de construction, dont chacun émet 9,8 kg de GES lors de sa fréquentation du port, ainsi que par l'augmentation attendue du trafic des camions de fret. Par ailleurs, il est à noter que la phase d'attente des camions constitue la principale source

d'émissions, représentant en moyenne 45% du total des émissions.

L'analyse de sensibilité, centrée sur le temps de chargement/déchargement, a révélé son importance cruciale pour évaluer la robustesse du modèle et l'influence de ce paramètre sur les émissions de GES. Cette analyse a montré que les variations de ce paramètre sont directement proportionnelles aux émissions dans différentes zones, soulignant l'importance d'adapter les stratégies de réduction des GES en fonction des spécificités de chaque zone.

Pour l'avenir, envisager une analyse de sensibilité détaillée sur d'autres paramètres tels que le temps d'attente et les temps de déplacement semble extrêmement utile. Cette approche pourrait offrir une compréhension claire des effets sur les tendances d'émission et identifier les paramètres les plus impactant, affinant ainsi les stratégies de réduction des GES. En outre, l'évolution future du modèle de simulation pourrait inclure une approche microscopique, prenant en compte des détails plus granulaires comme l'âge du camion, la charge transportée et le comportement de conduite.

Pour conclure, il est essentiel de disposer d'une estimation précise des émissions produites par le transport routier, en particulier celles émanant des camions, afin de gérer et réduire efficacement les émissions de GES dans les environnements portuaires. Atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050, bien qu'un défi considérable, est réalisable grâce à une optimisation approfondie des opérations. Cette stratégie doit être appuyée par l'introduction d'énergies à faible empreinte carbone, formant ainsi une approche globale et efficace de la réduction des émissions. Pour des considérations pratiques et imminentes, l'implémentation d'un modèle d'estimation des émissions de GES pour chaque trajet de camion dans le port s'avère cruciale. Cela permettrait aux administrations portuaires de calculer avec précision le bilan carbone de chaque camion sur une période donnée, de surveiller l'évolution des émissions au fil du temps, et d'évaluer l'impact des changements mis en œuvre. Cette approche, basée sur un inventaire réel des éléments du trafic de fret et non sur des modèles de simulation complexes, offre une solution concrète et pragmatique pour contrôler, analyser et réduire les émissions de GES liées aux activités portuaires.

RÉFÉRENCES

Ahn, K., & Trani, A. (2003). Comparison of MOBILE5a, MOBILE6, VT-MICRO, and CMEM models for estimating hot-stabilized light-duty gasoline vehicle emissions. *Canadian Journal of Civil Engineering - CAN J CIVIL ENG*, 30, 1010-1021. <https://doi.org/10.1139/103-017>.

Ahn, K., Trani, A., & Aerde, M. (2002). Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels. *Journal of Transportation Engineering- asce - J TRANSP ENG-ASCE*, 128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:2\(182\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(182)).

Akman, B. (2021). What are the Shipping Methods Without Containers? <https://www.morethanshipping.com/what-are-the-shipping-methods-without-containers>.

AlKheder, S., Naif, D., Musaed, D., Al Shrekah, S., Al Rshaid, M., Al. Anzi, N., & Baqer, I. (2022). Maritime transport management in Kuwait toward an automated port logistical city. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 3, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100031>.

Arango, C. (2019). A simulation model for the management for containers internal transport in a seaport. *Cuadernos de Administración*, 35, 95-108. <https://doi.org/10.25100/cdea.v35i64.7705>.

Azab, A., & Eltawil, A. (2016). A Simulation Based Study Of The Effect Of Truck Arrival Patterns On Truck Turn Time In Container Terminals. <https://doi.org/10.7148/2016-0080>.

Azab, A., Karam, A., & Eltawil, A. (2019). A simulation-based optimization approach for external trucks appointment scheduling in container terminals. *International Journal of Modelling and Simulation*, 1–18.

Barth, M., An, F., Norbeck, J., & Ross, M. (1996). Modal Emissions Modeling: A Physical Approach. *Transportation Research Record*, 1520(1), 81-88. <https://doi.org/10.1177/0361198196152000110>.

Barth, M., Boriboonsomsin, K. (2008). Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion.

Barth, M., An, F., Younglove, T., Scora, G., Levine, C., Ross, M. & Wenzel, TH (2000). Recent Validation Efforts for a Comprehensive Modal Emissions Model. NCHRP Web-Only Doc, 122, pp. 250.

Board, T. R., National Academies of Sciences, Engineering, & Medicine. (1995). Expanding Metropolitan Highways: Implications for Air Quality and Energy Use – Special Report 245. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9676>.

Boile, M., Thefanis, S., Golias, M., Dougherty, P., & Sdoukopoulos, E. (2013, juillet). Gate strategies' impact on marine container terminal access networks.

Brodrick, C.-J., Lipman, T., Farshchi, M., Lutsey, N., Dwyer, H., Sperling, D., Gouse, S. W., Harris, D. B., & King, F. (2002). Evaluation of fuel cell auxiliary power units for heavy-duty diesel

trucks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 7, 303-315. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(01\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00026-8).

Caballini, C., Gracia, M. D., Mar-Ortiz, J., & Sacone, S. (2020). A combined data mining – optimization approach to manage trucks operations in container terminals with the use of a TAS: Application to an Italian and a Mexican port. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142, 102054. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102054>.

Changements climatiques. (2014). Rapport de synthèse : Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, 2014, 161 p.

Chen, G., & Yang, Z. (2010). Optimizing time windows for managing export container arrivals at Chinese container terminals. *Maritime Economics & Logistics*, 12(1), 111–126.

Chen, G., Govindan, K., & Golias, M. M. (2013). Reducing truck emissions at container terminals in a low carbon economy: Proposal of a queueing-based bi-objective model for optimizing truck arrival pattern. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 55, 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.03.008>.

Chen, G., Govindan, K., & Yang, Z. (2013). Managing truck arrivals with time windows to alleviate gate congestion at container terminals. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.033>.

Chen, X., Zhou, X., & List, G. F. (2011). Using time-varying tolls to optimize truck arrivals at ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 965-982. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.04.001>.

Chung, K. H., Ko, C., Shin, J., Hwang, H., & Kim, K. (2007). Development of mathematical models for the container road transportation in Korean trucking industries. *Computers & Industrial Engineering - COMPUT IND ENG*, 53, 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.017>.

Do, N.A.D., Nielsen, I.E., Chen, G., & Peter Nielsen, P. (2014). A simulation-based genetic algorithm approach for reducing emissions from import container pick-up operation at container terminal. *Annals of Operations Research*, 285-301.

Dragovic, B., Tzannatos, E., & Park, N. K. (2017). Simulation modelling in ports and container terminals: Literature overview and analysis by research field, application area and tool. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29. <https://doi.org/10.1007/s10696-016-9239-5>.

Du, Y., Chen, Q., Quan, X., Long, L., & Fung, R. Y. K. (2011). Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 1021-1037. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.05.011>.

Dumetz, L., Rönnqvist, M., AUDY, J.-F., Flisberg, P., & Leclerc, M. (2019). Assessment of Fuel Consumption and GHG Emissions in Road Forest Transportation (Évaluation de la consommation de carburant et des émissions de GES en transport forestier routier). *International Journal of Industrial Engineering*.

Elkafoury, A., Bady, M., Aly, M., Aly, F., & Negm, A. (2013, mars). Emissions Modeling for Road Transportation in Urban Areas : State-of-Art Review.

Environnement et Changement climatique Canada. (2022). Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Émissions de gaz à effet de serre.

Environnement et Changement climatique Canada. (2023). Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Émissions de gaz à effet de serre. Consulté le jour mois année. Disponible à : www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateursenvironnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html.

Figliozzi, M. A. (2011). The impacts of congestion on time-definitive urban freight distribution networks CO2 emission levels : Results from a case study in Portland, Oregon. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 766-778. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.11.002>.

Galal, A. (2017). Seaports as a Tool for the Urban & Economic Development in Egyptian Coastal Cities. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3170900>.

GAO. (2022). Maritime Cargo Security CBP Should Provide Additional Guidance for Certain Non-Containerized Cargo Inspections. <https://www.gao.gov/assets/gao-22-104210.pdf>.

GEF-UNDP-IMO GloMEEP Project and IAPH. (2018). Development of port emissions reduction strategies. *Port Emissions Toolkit, Guide No.2*.

Giuliano, G., O'Brien, T., Dell'aquila, P., & Hayden, S. (2006). The Terminal Gate Appointment System at the Ports of Los Angeles and Long Beach: An Assessment.

Giuliano, G., & O'Brien, T. (2007). Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the Ports of Los Angeles and Long Beach. *Transportation Research Part D*, 12, 460-473.

Giuliano, G., Hayden, S., Dell'aquila, P., & O'Brien, T. (2008). Evaluation of the Terminal Gate Appointment System at the Los Angeles/Long Beach Ports. METRANS Project 04-06.

Goudreau, É. (2018). Analyses des impacts de l'implantation d'un système de rendez-vous sur le trafic routier dans un port manutentionnant des produits non conteneurisés. Mémoire. Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, 137 p.

Goudreau, É., Baril, C., Gascon, V., & Audy J. F. (2017). Développement d'un outil de simulation du trafic routier au Port de Trois-Rivières et analyse de scénarios. Laboratoire de simulation et d'optimisation (SIMO). Université du Québec à Trois-Rivières, Canada.

Hall, D., & Lutsey, N. (2019). Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17010.86724>.

Harrison, R., Hutson, N., Prozzi, J., Gonzalez, J., McCray, J., & West, J. (2009). The Impacts of Port, Rail, and Border Drayage Activity in Texas, Center for Transportation Research. The

University of Texas at Austin.

Heilig, L., & S., Voß. (2017). Inter-terminal transportation: an annotated bibliography and research agenda. *Flex. Serv. Manufact*, 29 (1), 35–63.

Huynh, N., Harder, F., Smith, D., Sharif, O., & Pham, Q. (2011). Truck Delays at Seaports: Assessment Using Terminal Webcams. *Transportation Research Record*, 2222(1), 54-62. <https://doi.org/10.3141/2222-07>.

Huynh, N., & Walton, C.M. (2011). Improving efficiency of drayage operations at seaport container terminals through the use of an appointment system. In: Bose, J.W. (Ed.), *Handbook of Terminal Planning*. Springer, New York, pp. 323–344.

Imbleau, M. (2022). Vers un nouveau « cocktail transport » pour réduire nos GES, *Forum des affaires*, La presse.

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Jiang, L., Tang, Sh., Wang, Guangsheng., Yu, Tong., & Yuan, J. (2023). The evaluation of government subsidy policies on carbon emissions in the port collection and distribution network: a case study of Guangzhou Port. *Front. Mar. Sci. Ocean Solutions* Volume 10 - 2023 | <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1213701>.

Kanagaraj, V., & Treiber, M. (2019). Fuel-Consumption and CO2 Emissions Modells for Traffic. *International Climate Protection*.

Kangwon, Shin., & Jang-Pyo., Ch. (2011). Estimating Transportation-Related Greenhouse Gas Emissions in the Port of Busan, S. Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment* Vol. 5-1, pp.41-46, March 2011. Department of Urban Design and Development Engineering, Kyungsoong University, Busan, Korea.

Karafa, J. (2012). *Simulating gate strategies at intermodal marine container terminals*, MSc thesis. Memphis: University of Memphis.

Keceli, Y., Aksoy, S., & Aydogdu, V. (2013). A simulation model for decision support in Ro-Ro terminal operations. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 15. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.054896>

Kyoungcho, A. (1998). *Microscopic Fuel Consumption and Emission Modeling*. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

Lazic, M-B. (2004). Container terminal operation emissions. West coast region conference on marine port air quality impacts. Air and Waste Management Association, Seattle, Washington, USA.

Lee, D.-Y., Thomas, V. M. & Brown, M. A. (2013). Electric urban delivery trucks: Energy use, greenhouse gas emissions, and cost effectiveness. *Environmental Science and Technology*, 47 (14): 8022-8030.

Lee, G., You, S., Ritchie, S., Saphores, J.-D., Sangkapichai, M., & Jayakrishnan, R. (2009). Environmental Impacts of a Major Freight Corridor : A Study of the I-710 in California. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2123, 119-128. <https://doi.org/10.3141/2123-13>.

Li, Y., Lv, C., Yang, N., Liu, H., & Liu, Z. (2020). A study of high temporal-spatial resolution greenhouse gas emissions inventory for on-road vehicles based on traffic speed-flow model: A case of Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 277, 122419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122419>.

Liao, T.-Y., Ho, W. M., & Hu, T.-Y. (2012). Fuel consumption and emission models development and application for advanced traffic management strategies. 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 846-851. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2012.6338747>.

Lubulwa, G., Malarz, A., & Wang, S. (2014). An investigation of best practice landside efficiency at Australian container ports. ATRF 2011 - 34th Australasian Transport Research Forum.

Manuj, I., Mentzer, J., & Bowers, M. (2009). Improving the Rigor of Discrete-Event Simulation in Logistics and Supply Chain Research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39, 172-201. <https://doi.org/10.1108/09600030910951692>.

Massar, M.; Reza, I.; Rahman, S.M.; Abdullah, S.M.H.; Jamal, A.; & Al-Ismail, F.S. (2021). Impacts of Autonomous Vehicles on Greenhouse Gas Emissions—Positive or Negative? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 894 doi:10.3390/ijerph18115567.

Medda, F. (2010). Classification of Container Ports on The Basis of Networks. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:168266275>.

Misra, A., Panchabikesan, K., Gowrishankar, S. K., Ayyasamy, E., & Ramalingam, V. (2017). GHG emission accounting and mitigation strategies to reduce the carbon footprint in conventional port activities – A case of the Port of Chennai. *Carbon Management*. <https://doi.org/10.1080/17583004.2016.1275815>.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2023). Changement climatique : gaz à effet de serre . <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/>.

Morais, P., Lord, E. (2006). Terminal Appointment System Study. Transport Canada, Ottawa.

Moriarty, P., & Honnery, D. (2008). Mitigating greenhouse: Limited time, limited options. *Energy Policy*, 36(4), 1251-1256. <https://doi.org/DOI:101016/jenpol200801021>.

Murty, K., Wan, Y., Liu, J., Tseng, M., Leung, E., Lai, K.-K., & Chiu, H. (2005). Hongkong International Terminals Gains Elastic Capacity Using a Data-Intensive Decision-Support System. *Interfaces*, 35, 61-75. <https://doi.org/10.1287/inte.1040.0120>.

Neagoe, M., Hvolby, H. H., Taskhiri, M. S., & Turner, P. (2021). Using Discrete-Event Simulation to Compare Congestion Management Initiatives at a Port Terminal, *Simulation Modelling Practice*

and Theory.

Nielsen, I. E., Do, N. A. D., Nguyen, V. D., Nielsen, P., & Michna, Z. (2015). Reducing Truck Emissions in Import Operations at Container Terminal—A Case Study in a Singaporean Port. In P. Golińska & A. Kawa (Éds.), *Technology Management for Sustainable Production and Logistics* (p. 133-151). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33935-6_7.

Nurchahyo, R., Rifa'i, M., & Habiburrahman, M. (2020). Designing container trucks arrival schedule using truck turnaround time method at terminal Peti Kemas Selatan PT. Pelabuhan Tanjung Priok. *AIP Conference Proceedings*, 2227. <https://doi.org/10.1063/5.0000980>.

O'Brien, T & Le-Griffin, H.D. (2013). Impact of Streamlined Chassis Movements and Extended Hours of Operation on Terminal Capacity and Source-Specific Emissions Reduction.

Olaf, M. (2014). *Shipping Emissions in Ports* (Paris: OECD International Transport Forum) pp 6-9.

OPEC's World Oil Outlook. (2019). Disponible sur: <https://woo.opec.org/>.

Owen, J & Wargo, B. (2011) f. A Study by Pier-pass And Ability/Tri-Modal of Gate Turn Times in Los Angeles-Long Beach. *The journal of Commerce*.

Ozbas, B., Spasovic, L. N., Besenski, D., & Campo, Matthew. (2014). *Analyses of Interactions between the Marine Terminal and Highway Operations*. Rutgers University; New Jersey Institute of Technology.

Pachakis, D., Fidell, T., McNally, J., & Nye, L. (2008). Achieving emission reductions in container terminals through process change. *Harbours, Air Quality and Climate Change Conference*. Netherlands, Rotterdam.

Phan, M.-H., & Kim, K. (2016). Collaborative truck scheduling and appointments for trucking companies and container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.006>.

Port de Montréal. (2017). *Sommaire de L'Inventaire Des Émissions DE Gaz À Effet De Serre Et De Polluants Atmosphériques Sur Le Territoire Portuaire De MONTRÉAL Et contrecœur*. <https://www.port-montreal.com/fr/component/edocman/general/developpement-durable/27-sommaire-de-l-inventaire-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-de-polluants-atmospheriques-sur-le-territoire-portuaire-de-montreal-et-contrecoeur-2017>.

Port de Montréal. (2020). <https://www.portmtlcamions.com/>.

Port de Trois-Rivières. (2023). <https://porttr.com/administration-portuaire/a-propos/>.

Port de Vancouver. (2015). *Rapport d'Inventaire d'Émissions*. <https://www.portvancouver.com/wp-content/uploads/2017/12/2015PortEmissionsInventory.pdf>.

Port de Vancouver. (2018). *Rapport sur la Durabilité*. Repéré à <https://www.portvancouver.com/wp-content/uploads/2021/05/Rapport-DD-Port-Vancouver2018-FR-Reduced.pdf>.

Port of Los Angeles. (2020). Port of Los Angeles 2020 Expanded Greenhouse Gas Inventory. <https://www.portoflosangeles.org/getmedia/5a4ebabc-768a-482f-89df-fbe1b243a539/2020-expanded-ghg-report>.

Protocole de Kyoto. (1997). Traité international visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, signé en 1997 lors de la 3e conférence annuelle de la Convention (COP3) à Kyoto, au Japon.

Rajamanickam, G. D., & Ramadurai, G. (2015). Simulation of truck congestion in Chennai port. 2015 Winter Simulation Conference (WSC), 1904-1915. <https://doi.org/10.1109/WSC.2015.7408307>.

Ramirez-Nafarrate, A., Gonzalez Ramirez, R., Smith, N., Guerra-Olivares, R., & Voss, S. (2017). Impact on Yard Efficiency of a Truck Appointment System for a Port Terminal. *Annals of Operations Research*, 258. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2384-0>.

Rathnayake, J., Jing, L., & Erandi, D. (2015). Truck turnaround time problem at the port of Colombo and a solution through inland ports. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 21, 413. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2015.070208>.

Roso, V. (2007). Evaluation of the dry port concept from an environmental perspective : A note. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(7), 523-527. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.07.001>.

Rusca, F. V., Popa, M., Rosca, E., Rosca, M., & Rusca, A. (2018). Simulation model for maritime container terminal. *Transport Problems*, 13, 47-54. <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.4.5>.

Sgouridis, S., Makris, D., & Angelides, D. (2003). Simulation Analysis for Midterm Yard Planning in Container Terminal. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering-asce - J WATERW PORT COAST OC-ASCE*, 129. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2003\)129:4\(178\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:4(178)).

Saloodoo, Logistics dictionary. (2024). Non-Containerised Cargo (NCC)/Logistics Terms and Definitions. <https://www.saloodo.com/logistics-dictionary/non-containerised-cargo-ncc>.

Starcrest Consulting Group LLC. (2021). San Pedro Bay Ports. Emissions Inventory Methodology Report (version, 2).

Thu Tu Thi., H. (2019). Potentiel de réduction des émissions de GES du transport routier de fret. *Economies et finances*. Université Paris-Est; École Supérieure de Transport et de Communication de Hanoi (ESTC) (Hanoi), 2019. Français. NNT: 2019PESC2026.

Torkjazi, M., Huynh, N., & Shiri, S. (2018). Truck appointment systems considering impact to drayage truck tours. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116, 208-228. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.06.003>.

Tran, N., & Haasis, H. (2014). An empirical study of fleet expansion and growth of ship size in container liner shipping. *International Journal of Production Economics*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.016>.

Transportation and Climate Division Office of Transportation & Air Quality U.S. Environmental Protection Agency. (2012). Using MOVES for Estimating State and Local Inventories of On-Road Greenhouse Gas Emissions and Energy Consumption, United States Environmental Protection Agency (EPA).

Transports Canada., Région du Québec., Senes Consultants & Sns. Lavalin Environnement INC.(2009). Inventaires des émissions des opérations terrestres et maritimes au Port de Montréal.

Vlugt, D. (2009). Truck Congestion at and in the Terminal – A Simulation Study. Erasmus University Rotterdam.

Wang, M., Daamen, W., Hoogendoorn, S., & Arem, B. van. (2011). Estimating Acceleration, Fuel Consumption, and Emissions from Macroscopic Traffic Flow Data. *Transportation Research Record*, 2260(1), 123-132. <https://doi.org/10.3141/2260-14>.

Yi, S., Scholz-Reiter, B., Kim, T., & Kim, K. (2019). Scheduling appointments for container truck arrivals considering their effects on congestion. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 31, 1-33. <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09333-y>.

Zhang, J., Ioannou, P. A., & Chassiakos, A. (2006). Automated Container Transport System Between Inland Port and Terminals. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, 16(2), 95-118. <https://doi.org/10.1145/1138464.1138465>.